

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CURSO DE TECNOLOGIA EM CONCRETO

ALEXANDRE M. MACHADO  
JAMES DEAN SCHLOSER  
MAURÍCIO VILLATORE

**COMPARATIVO ENTRE RETÍFICAS DE CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2012

ALEXANDRE M. MACHADO  
JAMES DEAN SCHLOSER  
MAURÍCIO VILLATORE

## **COMPARATIVO ENTRE RETÍFICAS DE CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Tecnologia em Concreto do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, com requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador: MSc. Gilberto Walter Gogola

**CURITIBA  
2012**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

### **COMPARATIVO ENTRE RETIFICAS DE CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO**

Por

Alexandre M. Machado, James Dean Schloser e Maurício Villatore

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Concreto, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 15 de maio de 2012, pela seguinte banca de avaliação:

---

Prof. Orientador – Gilberto Walter Gogola  
UTFPR

---

Prof. Wellington Mazer  
UTFPR

---

Prof. Adauto José Miranda de Lima.  
UTFPR

---

Prof. Rodrigo Cesar Kanning  
IFPR

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por estar sempre ao nosso lado, guiando os nossos passos e nos auxiliando em todos os momentos de nossas vidas.

Ao incentivo de toda nossa família em especial as nossas esposas que sempre nos compreenderam e apoiaram em todos os momentos difíceis de nossas vidas, aos nossos filhos que sempre entenderam a nossa ausência no decorrer do curso.

Aos professores Gilberto Walter Gogola, Adauto José Miranda de Lima e Sandro Eduardo Mendes, pela orientação, dedicação, confiança e pela amizade que juntos construímos.

Aos amigos e colegas de faculdade pela amizade e ajuda nas confecções de idéias, planos e estudos.

Aos professores do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelos ensinamentos, apoio e oportunidade em nossa caminhada.

Aos Coordenadores responsáveis e laboratoristas das empresas que gentilmente nos ajudaram em nosso trabalho.

A equipe do Laboratório da UTFPR que nos ajudaram a realizar nossos experimentos.

A Metaflon Estufas Agrícolas e Teleinfra Serviços Ltda que nos cederam gentilmente os seus espaços e materiais para que pudéssemos concretizar este projeto.

## RESUMO

Os concretos são avaliados em função de sua resistência à compressão. Entretanto, esse ensaio pode apresentar dispersão de resultados. Dentre os fatores que podem causar estas dispersões citamos a planicidade, paralelismo e perpendicularidade das bases em relação ao eixo da amostra, que são foco de estudo deste trabalho. Esta pesquisa apresenta um comparativo entre máquinas retificadoras de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de diferentes mecanismos de desgaste. Foram avaliados equipamentos de 05 (cinco) laboratórios de Curitiba e Região Metropolitana; para o experimento, os concretos foram preparados, moldados, adensados e curados nas mesmas condições num total de 120 corpos-de-prova, divididos em 03 (três) classes de resistência, foram identificados e enviados aleatoriamente aos laboratórios onde foi realizado o desgaste dos mesmos; após a realização do ensaio de compressão axial, os resultados foram comparados estatisticamente.

**Palavras chaves:** Concreto. Ensaio de compressão axial. Retíficas de corpos-de-prova. Desgaste de Corpos-de-Prova. Controle estatístico.

## ABSTRACT

The concretes are evaluated in terms of its resistance to compression. However, this assay may provide dispersion results. Among the factors that can cause these quoted dispersions are: flatness, parallelism and perpendicularity of the bases relative to the axis of the sample, which are the focus of this paper. This research presents a comparative grinding machines for cylindrical specimens of concrete and different mechanisms of thinning. Equipment of five (05) laboratories in Curitiba and metropolitan region were evaluated. For the experiment, the concretes were prepared, molded, compacted and cured under the same conditions of a total of 120 specimens, then divided into 03 (three) classes of resistance, were randomly identified and sent to the laboratories where roughing was done on them. After completion of the axial compression test, the results were compared statistically.

**Keywords:** Concrete. Test of axial compression. Grinding of samples. Grinding Body of Evidence. Statistical control.

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva Granulométrica Brita 0 .....	64
Gráfico 2 – Curva Granulométrica Brita 1 .....	64
Gráfico 3 – Curva Granulométrica do Agregado Miúdo.....	66
Gráfico 4 – Médias dos desbastes das retíficas para 30,0, 60,0 e 90,0 MPa.....	77
Gráfico 5 – Média da relação h/d das retíficas para 30,0, 60,0 e 90,0 MPa .....	78
Gráfico 6 – Médias das tensões de ruptura dos corpos-de-prova retificados, ao ensaio de compressão axial .....	79
Gráfico 7 – Resultado do Desvio Padrão dos resultados das tensões de ruptura....	81
Gráfico 8 – Resultado do Coeficiente de Variação dos resultados das tensões de ruptura .....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Utilização de neoprene como almofada de capeamento elastomérico....	26
Tabela 2 – Abreviaturas dos compostos químicos do cimento .....	31
Tabela 3 – Fator de correção para aplicação na relação altura/diâmetro .....	41
Tabela 4 – Especificação das idades dos corpos-de-prova e suas tolerâncias permitidas.....	42
Tabela 5 – Relação água/cimento quanto à durabilidade .....	48
Tabela 6 – Estimativa da quantidade de água de amassamento por m <sup>3</sup> .....	48
Tabela 7 – Determinação do consumo de Agregado Graúdo por m <sup>3</sup> .....	50
Tabela 8 – Classificação comercial de britas .....	51
Tabela 9 – Proporcionamento de britas .....	51
Tabela 10 – Ensaio Físicos do cimento CP II-Z-32 .....	61
Tabela 11 – Ensaio Químicos do cimento CP II-Z-32.....	61
Tabela 12 – Ensaio Físicos do cimento CP V – ARI RS.....	62
Tabela 13 – Ensaio Químicos do cimento CP V – ARI RS.....	62
Tabela 14 – Granulometria da Brita 0 – Pedrisco.....	63
Tabela 15 – Granulometria da Brita 1 .....	63
Tabela 16 – Caracterização das Britas 0 e 1.....	65
Tabela 17 – Granulometria da Areia .....	65
Tabela 18 – Caracterização do Agregado Miúdo .....	66
Tabela 19 – Características da Adição – Sílica Ativa da TECNOSIL .....	67
Tabela 20 – Características do Aditivo SIKAVISCOCRETE 3535.....	67
Tabela 21 – Proporcionamento dos materiais por m <sup>3</sup> .....	69
Tabela 22 – Cronograma de execução dos trabalhos.....	71
Tabela 23 – Apresentação dos resultados para a classe de 30 MPa.....	75
Tabela 24 – Apresentação dos resultados para a classe de 60 MPa.....	76
Tabela 25 – Apresentação dos resultados para a classe de 90 MPa.....	76

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capeador de enxofre para corpos-de-prova de concreto.....	22
Figura 2 – Sistemas de capeamentos não colados.....	24
Figura 3 – Almofadas de neoprene para sistemas de capeamento não confinado. ...	25
Figura 4 – Capeador elastomérico - Base metálica com anel de retenção e almofadas de neoprene.....	26
Figura 5 – Retífica com fixação do corpo-de-prova pneumática e com disco rotativo adiamantado móvel.....	28
Figura 6 – Retífica com disco adiamantado fixo e movimentação do corpo-de-prova em mesa coordenada.....	29
Figura 7 – Gráfico do efeito do tempo de mistura com a resistência à compressão axial.....	35
Figura 8 – Corpo-de-prova sendo submetido a um ensaio de compressão axial.....	37
Figura 9 – Corpo-de-prova com ruptura cônica, consequência de adensamento e retífica satisfatórios. ....	37
Figura 10 – Curvas de frequência normais para diferentes desvios padrão .....	44
Figura 11 – Frequência de distribuição dos valores de resistência e distribuição normal correspondente .....	45
Figura 12 – Curva de relação água/cimento para resistência à compressão axial aos 28 dias.....	47
Figura 13 – Relações propostas entre a relação água/aglomerante e a resistência à compressão axial .....	53
Figura 14 – Determinação da dosagem mínima de água.....	54
Figura 15 – Teor de agregado graúdo.....	55
Figura 16 – Máquina retificadora 01.....	57
Figura 17 – Máquina retificadora 02.....	57
Figura 18 – Máquina retificadora 03.....	58
Figura 19 – Máquina retificadora 04.....	59
Figura 20 – Máquina retificadora 05.....	60
Figura 21 – Materiais dosados antes do preparo do concreto .....	68
Figura 22 – Ilustração da betoneira utilizada nos preparos dos concretos.....	70
Figura 23 – Ensaio de consistência através do teste de abatimento do tronco de cone (slump test).....	71

Figura 24 – Adensamento mecanizado dos corpos-de-prova .....	72
Figura 25 – Identificação dos corpos-de-prova .....	72
Figura 26 – Identificação dos corpos-de-prova .....	73
Figura 27 – Medição dos corpos-de-prova.....	74
Figura 27 – Teste do carbono efetuado em corpo-de-prova retificado.....	79
Figura 28 – Ajuste do êmbolo da prensa ao corpo-de-prova .....	80

## SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO .....	15
1.1 - Importância .....	15
1.2 - Justificativa .....	15
1.3 - Objetivo .....	17
1.4 - Estrutura do Trabalho .....	17
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 - Sistemas de Capeamento Colados .....	18
2.1.1 - Capeamento com Pasta ou Argamassa de Cimento .....	20
2.1.2 - Capeamento com Enxofre .....	21
2.2 - Sistemas de Capeamento não Colados .....	23
2.2.1 - Capeamento com Almofadas Elastoméricas .....	24
2.2.2 - Neoprene não Confinado .....	24
2.2.3 - Neoprene Confinado .....	25
2.3 - Sistemas de Desgaste Mecânico .....	27
2.4 - Resistência do Concreto.....	29
2.4.1 - Características e Proporções dos Materiais .....	30
2.4.2 - Relação Água/Cimento.....	30
2.4.3 - Ar Incorporado.....	30
2.4.4 - Tipo de Cimento .....	30
2.4.5 - Agregado .....	31
2.4.6 - Água de Amassamento .....	33
2.4.7 - Aditivos e Adições .....	33
2.4.8 - Sílica Ativa.....	34
2.4.9 - Mistura e Produção .....	35
2.4.10 - Outros Fatores.....	36
2.4.11 - Condições e Velocidade de Carregamento .....	38
2.4.12 - Retração Autógena.....	38
2.4.13 - Fatores de Influência .....	39
2.4.14 - Condições de Cura.....	39
2.4.15 - Tempo .....	40
2.4.16 - Temperatura .....	40

2.5 - Ensaio de Resistência à Compressão .....	41
2.5.1 - Procedimento de Execução do Ensaio .....	41
Resultados.....	42
2.6 - Métodos Estatísticos.....	43
2.6.1 - Funções Estatísticas .....	43
2.6.2 - Média ( $X$ ).....	44
2.6.3 - Desvio Padrão ( $\sigma$ ) .....	44
2.6.4 - Coeficiente de Variação (CV).....	45
2.6.5 - Análise da Variância.....	46
2.6.6 - Teste de Comparação de Médias.....	46
2.7 - Métodos de Dosagem.....	47
2.7.1 - Método de Dosagem ABCP .....	47
2.7.2 - Definição da Relação Água/Cimento (a/c).....	47
2.7.3 - Determinação Aproximada de Consumo De Água (Ca).....	48
2.7.4 - Determinação do Consumo de Cimento (C).....	49
2.7.5 - Determinação do Consumo de Agregado Graúdo (CG).....	49
2.7.6 - Determinação do Consumo de Agregado Miúdo (Cm ).....	51
2.7.7 - Método de Dosagem do CAD (AÏTCIN, 2000).....	52
2.7.8 - Relação Água/Aglomerante.....	52
2.7.9 - Teor de Água.....	53
2.7.10 - Dosagem do Superplastificante.....	54
2.7.11 - Teor de Agregado Graúdo.....	55
2.7.12 - Teor de Ar.....	55
3 - MÉTODOS E ENSAIOS.....	56
3.1 - Escolha das Máquinas Retificadoras.....	56
3.1.1 - Descrição da Máquina 01 .....	56
3.1.2 - Descrição da Máquina 02.....	57
3.1.3 - Descrição da Máquina 03.....	58
3.1.4 - Descrição da Máquina 04.....	58
3.1.5 - Descrição da Máquina 05.....	59
3.2 - Determinação Das Classes De Concreto .....	60
3.3 - Caracterização Dos Materiais.....	60
3.3.1 - Aglomerantes .....	60

3.3.2 - Agregado Graúdo .....	63
3.3.3 - Agregado Miúdo .....	65
3.3.4 - Adição .....	66
3.3.5 - Aditivo.....	67
3.3.6 - Água de Amassamento .....	68
3.3.7 - Proporcionamento dos Materiais .....	68
3.3.8 - Processo de Preparo dos Concretos.....	68
4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	75
4.1 - Resultados dos Desbastes das Retílicas .....	75
4.2 - Resultados da Relação h/d.....	77
4.3 - Resultados da Resistência à Compressão .....	78
4.4 - Análise Estatística dos Resultados.....	80
5 - CONCLUSÕES .....	82
5.1 - Sugestões para Pesquisas Futuras .....	82
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação Água/Cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio
ANOVA	Analysis of Variance
a <sub>r</sub>	Abatimento Requerido
ASTM	American Society for Testing and Materials
B0	Brita Zero
B1	Brita Um
B2	Brita Dois
B3	Brita Três
B4	Brita Quatro
C	Consumo de Cimento
C <sub>2</sub> S	Silicato Dicálcico
C <sub>3</sub> A	Aluminato Tricálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato Tricálcico
C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminato Tetracálcico
C <sub>a</sub>	Consumo de Água
CAD	Concreto de Alto Desempenho
C <sub>ai</sub>	Consumo de Água Inicial
CaO	Óxido de Cálcio
CAR	Concreto de Alta Resistência
C <sub>ar</sub>	Consumo de Água Requerida
CG	Consumo de Agregado
C <sub>m</sub>	Consumo Agregado Miúdo
CMN	Comitê Mercosul de Normalização
CP	Corpo-de-prova em Concreto
CV	Coefficiente de Variação
DACOC	Departamento Acadêmico de Construção Civil
D <sub>máx</sub>	Dimensão Máxima
DMC	Dimensão Máxima Característica

$f_c$	Resistência Média à Compressão do Concreto
$Fe_2O_3$	Óxido de Ferro
GPa	Gigapascal
h/d	Relação altura/diâmetro de um corpo-de-prova
$K_2O$	Óxido de Potássio
MF	Módulo de Finura da Areia
MgO	Óxido de Magnésio
$Mn_2O_3$	Trióxido de Manganês
MPa	Megapascal
MQG	Variância de Grupos
MQR	Variância de Médias
$Mu_g$	Massa Unitária Agregado Graúdo
$Na_2O$	Óxido de Sódio
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
PH	Potencial de Hidrogênio
ppm	Partes por Milhão
Sd	Desvio Padrão
$SiO_2$	Óxido de Silício
$SO_3$	Trióxido de Enxofre
$TiO_2$	Dióxido de Titânio
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
$V_G$	Volume de Agregado Graúdo
X	Resistência Média
$\mu m$	Mícron
%	Percentual

## **1 - INTRODUÇÃO**

### **1.1 - Importância**

Nas últimas décadas, tem-se obtido grandes avanços na tecnologia do concreto, face aos conhecimentos adquiridos pelos estudos da estrutura interna do concreto e ao advento de novos materiais, tais como os superplastificantes e as adições permitiram uma grande evolução nas resistências mecânicas do concreto e também em outras propriedades, proporcionando o surgimento dos concretos de alta resistência e de alto desempenho, os quais permitem a otimização de um ou mais parâmetros de caracterização de interesse do material, diferenciando-se, portanto, dos concretos convencionais, e exigindo maior rigor técnico e científico na sua elaboração, preparo e principalmente no controle laboratorial do concreto.

Nos últimos anos, os trabalhos técnicos e pesquisas apresentados em, congressos e simpósios têm mostrado a ineficiência na preparação da superfície dos corpos-de-prova, apresentando discrepância nos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial. Os métodos mais utilizados são capeamentos colados, capeamentos com pasta de cimento, capeamentos com enxofre, capeamentos não colados, almofadas elastoméricas e retíficas.

Bons resultados vêm sendo obtidos através de desbaste com máquinas retificadoras dos topos de corpos-de-prova, pois, estes dispositivos deixam as faces planas e perpendiculares à geratriz do corpo-de-prova, fazendo com que os resultados não tenham a influência de nenhum outro tipo de material que não seja o próprio concreto. Como as máquinas disponíveis no mercado não possuem uma padronização em seus princípios de funcionamento, o trabalho pretende apresentar um estudo comparativo entre eles.

### **1.2 - Justificativa**

Considerando que os avanços na tecnologia do concreto têm contribuído para obter melhores propriedades e características do mesmo, atendendo às necessidades atuais das mais diversas formas de emprego do concreto nas obras de engenharia. Sendo a resistência à compressão, a característica que melhor representa as demais propriedades dos concretos, que é adotada rotineiramente no controle de produção e controle de aceitação das estruturas de concreto por meio de

resultados do rompimento dos corpos-de-prova. Surgem, então, as atividades rotineiras e muito frequentes em canteiros de obras da moldagem de corpos-de-prova de concreto, e nos laboratórios de materiais a realização de preparo dos topos e ensaio de determinação da resistência à compressão. As condições ideais da superfície circular dos topos dos corpos-de-prova cilíndricos de concreto destinados ao ensaio de determinação da resistência à compressão axial são; a perpendicularidade desta face em relação ao eixo geratriz do cilindro que o contém e a planeza desta superfície.

Constata-se que os métodos consagrados de preparação destes topos, não são adequados ou afetam os resultados de resistência de ruptura dos corpos-de-prova, considerando principalmente para os concretos de alta resistência e auto desempenho.

A metodologia de retificar por desgaste os topos dos corpos-de-prova vem contribuir de forma a não necessitar de utilização de material de capeamento, bem como reduzir o tempo de preparo dos topos. Porém, constatou-se que há em laboratórios de ensaios de concreto, equipamentos de diversos tipos e de diversos princípios de funcionamento como forma de desgastar os topos dos corpos-de-prova. Surge então, a necessidade de realizar um estudo comparativo entre essas diversas concepções desses equipamentos, analisando os desvios, a confiabilidade e a dispersão dos resultados dos valores da resistência à compressão axial entre os diversos equipamentos.

Estudar o desempenho da metodologia de retificar os corpos-de-prova permitirá:

- a. Reunir dados e informações de forma a consagrar esta metodologia e distinguir entre as diversas concepções de funcionamento dos equipamentos.
- b. Diminuir o tempo necessário para o preparo dos topos, comparado com outros métodos.
- c. A eliminação de gases tóxicos emanados do processo e a eliminação do uso de energia calorífica como é o caso do método de capeamento com enxofre.
- d. A diminuição de descarte de resíduos, como elastômeros, pastas e argamassas de capeamento.

### **1.3 - Objetivo**

Realizar um estudo comparativo entre os resultados de rompimento de corpos-de-prova de concreto de cimento Portland em três classes de resistência à compressão axial, pré-estabelecidas, em cinco máquinas retificadoras utilizadas em diferentes ambientes na região de Curitiba.

### **1.4 - Estrutura do Trabalho**

O presente trabalho se apresenta com as seguintes partes:

- No Capítulo I se desenvolveu a introdução do tema, a justificativa, os objetivos e a presente estrutura deste.
- No Capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica.
- No Capítulo III são apresentados os métodos desenvolvidos neste trabalho com a finalidade de atender aos objetivos propostos.
- No Capítulo IV são apresentados os resultados obtidos e comentários pertinentes.
- No Capítulo V é apresentada a conclusão sobre os resultados.
- No Capítulo VI é apresentada a lista de referências bibliográficas.

## **2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O comportamento mecânico do concreto tem um desempenho satisfatório quando submetido aos esforços de compressão, uma vez que o mesmo se torna muito frágil aos esforços de tração. A resistência à compressão do concreto depende de vários fatores, como o material utilizado em seu preparo, relação água/cimento, idade, cura e moldagem dos corpos-de-prova.

Para Mehta e Monteiro (2008), no projeto e controle de qualidade do concreto, a resistência é uma propriedade normalmente especificada, porque, comparado aos ensaios envolvendo outras propriedades, o ensaio de resistência é relativamente fácil. Além disso, acredita-se que muitas das propriedades do concreto, como módulo de elasticidade, estanqueidade ou impermeabilidade, e resistência a intempéries, incluindo águas agressivas, estão ligadas à resistência e, por isso podem ser deduzidas a partir dos dados da resistência.

A resistência à compressão do concreto é muitas vezes maior do que outros tipos de resistência. Assim a maior parte dos elementos de concreto é projetada para tirar vantagem de uma maior resistência à compressão do material. Embora, na prática, a maior parte do concreto esteja sujeita simultaneamente à combinação de tensões de compressão, de cisalhamento e de tração em duas ou mais direções, os ensaios de compressão uniaxial são mais fáceis de realizar em laboratórios, e o ensaio da resistência à compressão para o concreto aos 28 dias é aceito universalmente como um índice geral da resistência do concreto, (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

### **2.1 - Sistemas de Capeamento Colados**

Os sistemas de capeamento colados consistem em regularizar a superfície dos topos do corpo-de-prova com a utilização de materiais aderentes ao mesmo.

Segundo a Norma Brasileira NBR 5738 (ABNT, 2003), o capeamento consiste no revestimento dos topos dos corpos-de-prova com uma fina camada de material apropriado, com as seguintes características:

- Ter aderência ao corpo-de-prova;
- Ser compatível quimicamente com o concreto;
- Ter fluidez, no momento de sua aplicação;

- Proporcionar acabamento liso e plano após endurecimento;
- Ter resistência à compressão compatível com valores normalmente obtidos em concreto.

A norma NBR 5738 (ABNT, 2003) ainda cita que:

- Deve ser utilizado um dispositivo auxiliar, denominado capeador, que garanta a perpendicularidade da superfície obtida com a geratriz do corpo-de-prova;
- A superfície resultante deve ser lisa, isenta de riscos ou vazios e não ter falhas de planicidade superiores a 0,05 mm em qualquer ponto;
- Espessura da camada de capeamento não deve exceder 3,0 mm em cada topo.

Segundo Bezerra (2007), outros métodos podem ser utilizados, desde que sejam avaliados estatisticamente e seus resultados sejam compatíveis com o sistema de capeamento tradicional.

A norma NBR 5738 (ABNT, 2003) estabelece que a preparação dos topos de corpos-de-prova cilíndricos de concreto fresco deve ser realizada com pasta ou argamassa de cimento e a preparação dos corpos-de-prova cilíndricos de concreto endurecido e dos testemunhos cilíndricos de estruturas de concreto deve ser realizada com argamassas de enxofre ou por processo de desgaste mecânico, com disco diamantado.

Bucher e Rodrigues Filho (1983) concluíram que as propriedades do material para capeamento:

- Tanto a resistência mecânica como o módulo de elasticidade devem ser iguais ou superiores ao dos corpos-de-prova no instante do ensaio;
- O capeamento deve, em curto espaço de tempo, desenvolver elevadas resistências à compressão, de forma a que no caso de danos sofridos na camada momentos antes do ensaio ou para o remate de testemunhos recém chegados ao laboratório para ensaio, possa o mesmo ser rapidamente aplicado sem interferir na idade do ensaio;
- A espessura da camada de capeamento deve ser a menor possível e de no máximo 3,0 mm;

- O material deve ter uma boa aderência com a superfície da argamassa e/ou concreto;
- O material deve ser homogêneo e isotrópico;
- Tanto as condições de aplicação do capeamento, como o próprio material utilizado, não devem afetar sensivelmente as propriedades do corpo-de-prova;
- A manipulação deve ser simples e segura, do ponto de vista do ensaio;

### 2.1.1 - Capeamento com Pasta ou Argamassa de Cimento

Segundo a norma NBR 5738 (ABNT, 2003), antes de realizar os ensaios de compressão axial dos corpos-de-prova cilíndricos, é necessário preparar seus topos, para os mesmos se tornarem superfícies planas e perpendiculares ao eixo longitudinal. Ainda poderá ser feito um procedimento opcional de remate com pasta de cimento, que consiste em:

- a) Decorridas 6 a 15 horas do momento da moldagem, passar uma escova de aço sobre o topo do corpo-de-prova e rematá-lo com uma fina camada de pasta de cimento consistente, com espessura menor ou igual a 3,0 mm;
- b) A pasta deve ser preparada cerca de 2 a 4 horas antes de seu emprego;
- c) O acabamento dos topos dos corpos-de-prova deve ser feito com o auxílio de uma placa de vidro plana, com no mínimo 12,0 mm de espessura e dimensões que ultrapassem em pelo menos 25,0 mm a dimensão transversal do molde;
- d) A pasta de cimento colocada sobre o topo do corpo-de-prova deve ser trabalhada com a placa até que a face inferior desta fique em contato firme com a borda superior do molde em todos os pontos;
- e) A aderência da pasta à placa de capeamento deve ser evitada, lubrificando-se esta última com uma fina película de óleo mineral;
- f) A placa deve permanecer sobre o topo do corpo-de-prova até a desforma. Os corpos-de-prova que não tiverem sido rematados devem ser capeados ou retificados.

A Norma Mercosul NM 77:96 (CMN, 1996) especifica que a pasta de cimento deve ter consistência adequada e obtida através da relação água/aglomerante na ordem de 0,32 a 0,36 (em massa) com cimento Portland comum e 0,35 a 0,39 com

cimento Portland de alta resistência inicial. Já a argamassa de cimento deve ter dosagem de 1:1 em massa, com areia passante pela peneira 300 µm e retida na peneira 150 µm, com relação água/aglomerante na ordem de 0,38.

### 2.1.2 - Capeamento com Enxofre

Segundo Bucher e Rodrigues Filho (1983), o processo de capeamento com uma mistura de enxofre com filler inerte é utilizado desde meados da década de 20, pela sua facilidade de aplicação, porém é um processo perigoso pela alta temperatura para adquirir o estado líquido além da emissão de gases para a atmosfera. Exigindo precauções quanto à segurança.

Atualmente, tem-se utilizado somente o enxofre sem adições em estado líquido (fundido) para o capeamento. O uso do enxofre como material de capeamento tem como vantagens o endurecimento rápido, alta produtividade no tocante a número de unidades capeadas num determinado período de tempo, boa aderência e elevada resistência à compressão às primeiras horas de idade (BUCHER e RODRIGUES FILHO, 1983).

A NM 77:96 (CMN, 1996) prevê a preparação dos topos de corpos-de-prova de concreto endurecido em cura úmida ou curado ao ar com argamassa de enxofre. Recomenda-se o corte com disco diamantado quando os corpos-de-prova de concreto apresentarem uma base muito irregular e não possa realizar o capeamento com argamassa de enxofre, de forma a obter uma superfície perfeitamente plana, que permita realizar o ensaio de compressão. A referida norma ainda recomenda que a resistência à compressão da argamassa de enxofre seja superior a 34,5 MPa após 2 h a sua moldagem, e permite que qualquer material seja utilizado para preparar as bases, desde que a espessura da camada seja no mínimo 3 mm e em nenhum ponto da superfície exceda a 8 mm. Cita, ainda, que o material de capeamento não deve fluir nem fraturar durante o ensaio dos corpos-de-prova e deve apresentar resistência à compressão e módulo de elasticidade superiores ao do concreto a ser ensaiado. A norma NM 77:96 (CMN, 1996) recomenda a seguinte dosagem aproximada em massa para a argamassa de enxofre:

- 75% de enxofre;
- 05% de grafite;
- 20% de material inerte.

Para garantir que o capeamento com enxofre fundido atenda os quesitos de espessura da camada, perpendicularidade da face com o eixo longitudinal do corpo-de-prova e obtenha superfície perfeitamente plana, é utilizado um capeador de enxofre, que é composto pelo gabarito capeador e prato de capeamento, que podem ser vistos na Figura 1.



Figura 1 – Capeador de enxofre para corpos-de-prova de concreto

(Fonte – Web Site Solotest em 12/05/11)

Ainda segundo a NM 77:96 (CMN, 1996), a argamassa de enxofre deve ser formada por uma mistura de enxofre, grafite e material granuloso que passe pela peneira 150  $\mu\text{m}$ , tendo resistência à compressão superior a resistência do corpo-de-prova a ser ensaiado.

A norma americana ASTM C 617 (ASTM, 1998), prevê a preparação da argamassa de enxofre no mínimo 2h antes do ensaio para concretos com resistência menor que 35,0 MPa. Para concretos com resistência igual ou superior a 35,0 MPa, o capeamento de argamassa de enxofre deve ser preparado pelo menos 16h antes do ensaio.

A norma NBR 7215 (ABNT, 1996), diz que o material para capeamento deve ser preparado fundindo-se enxofre com filler, em proporções que não interfiram no resultado do ensaio. Os corpos-de-prova devem ser capeados com a mistura de

enxofre a quente, de maneira que a camada formada em cada extremidade satisfaça às condições geométricas e apresente espessura máxima de 2 mm.

A grande desvantagem do capeamento com argamassa de enxofre é a liberação do gás sulfídrico durante a fusão do enxofre em pó quando contaminado com materiais orgânicos, como parafina ou óleo. Em concentrações elevadas é letal.

## **2.2 - Sistemas de Capeamento não Colados**

O sistema de capeamento não colado ao concreto consiste no uso de um material como interface entre os topos do corpo-de-prova e o prato do cilindro da prensa, podendo ser confinado ou não. Atualmente os materiais mais utilizados são os elastômeros, principalmente o neoprene, mas também podem ser usados areias e outros materiais.

Segundo Bucher e Rodrigues Filho (1983), a utilização de lâminas de papelão, chumbo ou borracha, interpostas entre os pratos da máquina e os topos dos corpos-de-prova, foram utilizadas durante certa época substituindo o capeamento por enxofre. Não tiveram resultados satisfatórios porque as lâminas possuem baixa resistência ou escoam sob carga, produzindo tensões de tração tangenciais que fazem com que os corpos-de-prova rompam pela combinação de tração e compressão com a conseqüente queda acentuada da resistência à compressão, as mesmas tiveram que ser gradativamente abandonadas. Também eram utilizados leitos confinados de areia de granulometria entre 0,84 e 0,60 mm, mas eram satisfatórios somente para concretos de até 25 MPa de resistência, limitados às folgas entre o anel de retenção da areia e o cilindro de ensaio. A Figura 2 mostra dois tipos de capeamentos não colados, (a) almofada polimérica restringida por anel de metal e (b) areia em contêiner rígido de metal.

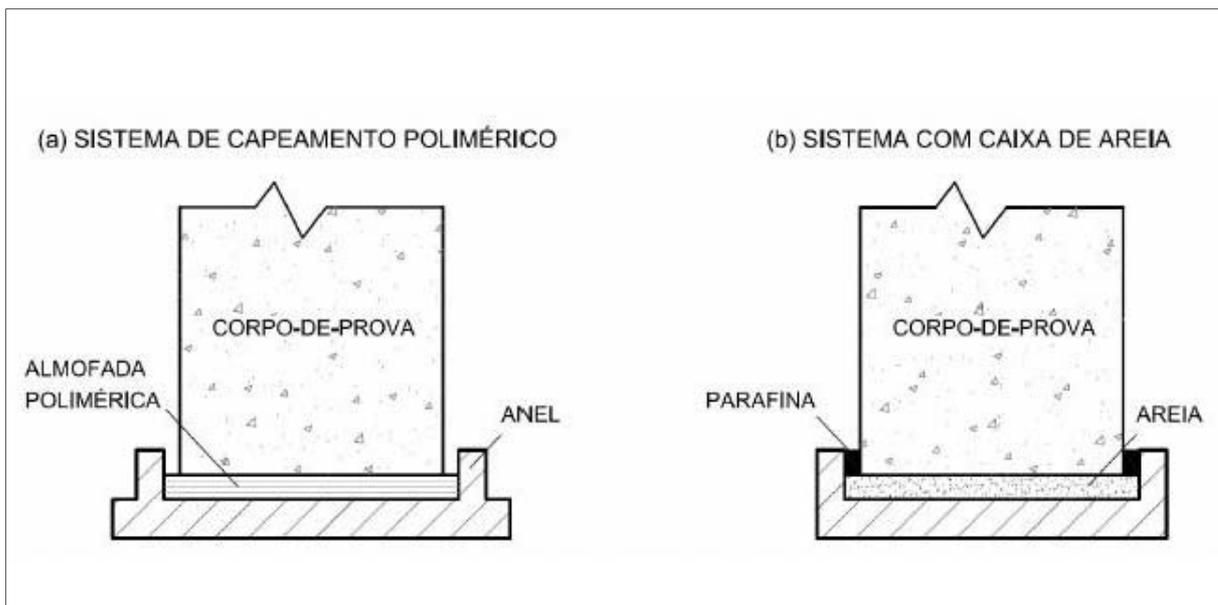


Figura 2 – Sistemas de capeamentos não colados

(Fonte BUCHER e RODRIGUES FILHO, 1983).

### 2.2.1 - Capeamento com Almofadas Elastoméricas

O capeamento com almofadas elastoméricas está sendo amplamente utilizado no Brasil e no mundo, mas ainda existem poucos estudos a respeito do seu emprego.

O principal elastômero pesquisado e utilizado no ensaio de resistência à compressão é o Policloroprene, comercialmente conhecido como neoprene. (BEZERRA, 2007)

### 2.2.2 - Neoprene não Confinado

O capeamento com almofadas de neoprene não confinado foi estudado por alguns autores. Marco, et all (2003) apud Bezerra (2007) perceberam disparidade e inconsistência dos resultados obtidos com o capeamento de neoprene não confinado em relação ao capeamento de enxofre.

Isso ocorre devido ao fato que não confinado a almofada de neoprene deforma-se radialmente mais que o corpo-de-prova ensaiado, gerando forças de tração na base dos corpos-de-prova.



Figura 3 – Almofadas de neoprene para sistemas de capeamento não confinado.

(Fonte – Web Site Solotest em 12/05/11)

### 2.2.3 - Neoprene Confinado

O capeamento elastomérico, usualmente, é utilizado confinado por uma base metálica para limitar a deformação lateral do elastômero.

As almofadas elastoméricas deformam-se no carregamento inicial para conformar-se às extremidades do corpo-de-prova e são contidas da propagação excessiva da lateral por placas e anéis de metal que garantem uma distribuição uniforme da carga aplicada pelo equipamento de ensaio (ASTM 1231/C 1231M, 2000).

Segundo a ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2000), os capeamentos não colados não devem ser usados para ensaios de aceitação de concretos com resistências abaixo de 10,0 MPa ou acima de 85,0 MPa.

O capeamento com almofadas de neoprene confinadas é composto por um par de almofadas e um par de bases metálicas com anel que envolve a almofada de neoprene.



Figura 4 – Capeador elastomérico - Base metálica com anel de retenção e almofadas de neoprene  
(Fonte – Web Site Solotest em 12/05/11)

A norma ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2000), prevê o uso do neoprene como almofada de capeamento elastomérico dentro das condições da Tabela 1 e com espessura de  $13 \pm 2$  mm. O diâmetro da almofada de neoprene não deve ser mais que 2 mm menor que o anel de retenção.

Condições para o uso de almofadas de policloroprene - Neoprene

Tabela 1 – Utilização de neoprene como almofada de capeamento elastomérico

Resistência à compressão do corpo-de-prova (MPa)	Dureza Shore A	Teste de Qualificação	Número Máximo de Reuso
10 a 40	50	Não	100
17 a 50	60	Não	100
28 a 50	70	Não	100
50 a 80	70	Necessário	50
Acima de 80	--	Não Permitido	--

(Fonte - BEZERRA, 2007)

É válido ressaltar que segundo a norma ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2000), desníveis transversais ao diâmetro dos topos dos corpos-de-prova não devem exceder 5 mm.

Se as extremidades do cilindro não se enquadrarem nesta tolerância, o corpo-de-prova não deve ser testado a menos que as irregularidades sejam corrigidas por corte ou retífica.

A norma ASTM C 1231/C 1231M (ASTM, 2000), restringe a cavidade no reforço metálico a uma profundidade de pelo menos duas vezes a espessura da almofada. O diâmetro interno dos anéis de retenção não será menos de 102% ou no máximo 107% do diâmetro do corpo-de-prova. As bases do reforço metálico que contatam com os pratos da máquina de ensaios serão planas com no máximo 0,05 mm de desnível.

A superfície do corpo-de-prova deve ser plana, colocado sobre uma superfície que permita à base de pressão tomar apoio sobre o corpo-de-prova, em uma superfície que possua um raio de pelo menos 6 mm ao redor da ponta do penetrador. Determinações satisfatórias de dureza por meio de um durômetro não podem ser efetuadas sobre superfícies arredondadas, irregulares ou rugosas ( NBR 7456 (ABNT, 1982).

### **2.3 - Sistemas de Desgaste Mecânico**

Consiste na remoção, por meios mecânicos, de uma fina camada de material do topo a ser preparado. Esta operação é normalmente executada em máquinas especialmente adaptadas para essa finalidade, com a utilização de ferramentas abrasivas. A retificação deve ser feita de tal forma que se garanta a integridade estrutural das camadas adjacentes à camada removida, e proporcione uma superfície lisa e livre de ondulações e abaulamentos. As falhas de planicidade em qualquer ponto da superfície obtida, não devem ser superiores a 0,05 mm (BEZERRA, 2007).

A Figura 5 mostra uma retífica com fixação do corpo-de-prova pneumática e com disco rotativo adiamantado móvel, possuindo o seguinte princípio de funcionamento.

- A fixação do corpo-de-prova por meio de êmbolo pneumático pontual ao mesmo;

- A posição do corpo-de-prova é perpendicular ao sentido de desbaste do disco adiamantado;
- Refrigeração controlada manualmente pelo fluxo de água localizada junto ao disco, sem reaproveitamento da mesma;
- O avanço do disco adiamantado pode ser manual ou automático, conforme o método de fabricação.



Figura 5 – Retífica com fixação do corpo-de-prova pneumática e com disco rotativo adiamantado móvel

(Fonte: Os autores setembro de 2009)

A Norma Mercosul NM 77:96 (CMN, 1996), diz que quando os corpos-de-prova de concreto apresentarem uma base muito irregular e não se possa realizar o capeamento com argamassa de enxofre, deve-se proceder ao corte com disco adiamantado, de forma a obter uma superfície perfeitamente plana, que permita realizar o ensaio de compressão.

A Figura 6 ilustra uma retífica, não disponível no mercado, com disco rotativo adiamantado fixo e movimentação do corpo-de-prova através de mesa coordenada, possuindo o seguinte princípio de funcionamento.

- A fixação do corpo-de-prova é feita com perfil metálico tipo cantoneira, longitudinal ao mesmo, sobre mesa coordenada;
- A posição do corpo-de-prova é perpendicular ao sentido de desbaste do disco adiamantado;

- Refrigeração automática por bomba submersa, o fluxo de água é contínuo junto ao disco, com reaproveitamento da mesma;
- O avanço do corpo-de-prova é manual em dois sentidos perpendiculares, através da mesa coordenada.



Figura 6 – Retífica com disco adiantado fixo e movimentação do corpo-de-prova em mesa coordenada

(Fonte: Os autores setembro de 2009)

O investimento inicial e o custo de operação dos equipamentos de retífica, geralmente, são muito altos em comparação com os demais sistemas de capeamento, desta forma restringindo seu uso.

## 2.4 - Resistência do Concreto

Em materiais sólidos a resistência é inversamente proporcional com o volume de vazios, para Mehta e Monteiro (2008) a resistência do concreto é justamente limitada pela porosidade e não está somente relacionada ao fator água/cimento, mas também a outros fatores como adensamento, grau de hidratação do cimento (cura), agregados (mineralogia e dimensão), tipos de aditivos, adições, geometria dos corpos-de-prova e velocidade de carregamento de tensão no momento do ensaio.

Os fatores referentes a propriedades e proporções afetam a porosidade da pasta e zona de transição na interface entre pasta e agregado.

Como são interações complexas de resultados de diferentes tipos de materiais e processos, os mesmos podem ser explicados separadamente.

#### 2.4.1 - Características e Proporções dos Materiais

As características do concreto são obtidas em função das características e proporções dos materiais que o compõe. Um proporcionamento adequado dos materiais utilizando um método de dosagem resultará em um concreto com as propriedades requeridas.

#### 2.4.2 - Relação Água/Cimento

Norteadas pelas inúmeras pesquisas realizadas por Duff Abrams, a conhecida Lei de Abrams da relação água/cimento, foi mostrada a relação entre a resistência do concreto e a quantidade de água utilizada na mistura, basicamente o aumento da porosidade ser proporcional ao aumento da relação água/cimento. Tal proporção é direta para concretos de baixa e média resistência, porém para concretos de alta resistência onde a relação água/cimento é abaixo de 0,3; os aumentos de resistência são desproporcionais devido a um melhor desempenho da zona de transição (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

#### 2.4.3 - Ar Incorporado

O aumento da porosidade causado pela utilização de aditivos incorporadores de ar ou até mesmo originado por um adensamento inadequado resulta normalmente em perda de resistência,

#### 2.4.4 - Tipo de Cimento

As variações no grau de finura dos diferentes tipos de cimento influem diretamente na porosidade do concreto devido à hidratação do cimento, entretanto essas diferenças desaparecem quando alcançarem um grau de hidratação semelhante, ou seja, ao final dos 28 dias de cura (NEVILLE, 1997).

Segundo Neville (1997), a composição química do cimento Portland se constitui principalmente das seguintes substâncias: calcário, sílica, alumina e óxido

de ferro, estas quando submetidas ao forno, reagem, dando origem a produtos mais complexos alcançando um estado de equilíbrio químico, com exceção de resíduos de calcário não combinado que não tiveram tempo de reagir, porém o equilíbrio não se mantém durante o resfriamento. A velocidade de resfriamento afetará a cristalização e a quantidade de material amorfo presente no clínquer resfriado. A abreviatura utilizada pelos químicos do cimento na sua composição está disposta conforme tabela 2.

Tabela 2 – Abreviaturas dos compostos químicos do cimento

Composto	Constituição	Símbolo
Silicato Tricálcico	$3CaO.SiO_2$	$C_3S$
Silicato Dicálcico	$2CaO.SiO_2$	$C_2S$
Aluminato Tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	$C_3A$
Ferroaluminato Tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	$C_4AF$

(Fonte: NEVILLE, 1997)

Além destes, existem compostos secundários que representam uma porcentagem reduzida da massa de cimento. (MgO, TiO<sub>2</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O). Teores de C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S / adições / condições e armazenamento.

#### 2.4.5 - Agregado

Segundo Neville (1997), as características do agregado muitas vezes são descartadas pelo excesso de ênfase dada à relação água/cimento. Sabe-se que, com exceção dos agregados leves, a resistência do concreto referente ao agregado é superior ao da matriz e interface da zona de transição, para concretos de baixa a média resistência. Porém, há outras características como dimensão, forma, textura superficial, granulometria e mineralogia, que podem afetar e provocar variações na resistência e alterar a relação fator água/cimento.

Para Neville (1997), a tensão em que se formam as fissuras em concretos depende muito das propriedades do agregado graúdo, os seixos lisos conduzem a uma fissuração quando submetida à tensão menor do que as britas ásperas e angulosas, pelo fato da aderência mecânica ser influenciada pelas características da superfície e forma do agregado, porém em concretos de resistências elevadas a

forma e textura superficial têm menor influência e passa a depender da relação água/cimento. A relação agregado/cimento é um fator secundário, mas foi constatado que para uma mesma relação água/cimento os concretos mais pobres têm resistência maior, uma vez que a absorção de água pelo agregado é maior em quantidades maiores do mesmo. A resistência à compressão diminui gradualmente quando o volume de agregado aumenta de 0 a 20%, mas aumenta quando este volume atinge 40 a 80% do total.

A resistência à compressão, a resistência à abrasão e o módulo de elasticidade do agregado são propriedades inter-relacionadas que são muito influenciadas pela porosidade. Agregados de origem natural comumente utilizados para a produção de concreto de densidade normal geralmente são densos e resistentes; portanto, raramente são fator limitante de resistência e das propriedades elásticas do concreto. Valores típicos de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico para a maioria dos agregados de granito, basalto, rochas plutônicas, flint, arenito quartzítico e calcários densos variam de 210 a 310 MPa e de 70 a 90 GPa, respectivamente. Nas rochas sedimentares a porosidade tem uma grande variação, bem como a resistência à compressão e características relacionadas. Em uma investigação envolvendo 241 calcários e 79 arenitos, enquanto as resistências máximas à compressão para cada tipo de rocha foram da ordem de 240 MPa, alguns calcários e arenitos apresentaram baixa resistência à compressão, 96,0 MPa e 48,0 MPa, respectivamente (NEVILLE, 1997).

Segundo a norma NBR 7211 (ABNT, 2005) a dimensão máxima característica do agregado, ou apenas dimensão máxima, é convencionalmente designada pela grandeza associada à abertura nominal da peneira, em mm na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Em geral, quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume que deve ser coberta pela pasta de cimento para uma dada relação água/cimento.

Para Mehta e Monteiro (2008), as partículas grandes tendem a apresentar mais microfissuras na zona de transição na interface entre o agregado gráudo e a pasta de cimento. Para misturas de concreto de altas resistências, a dimensão máxima do agregado geralmente fica limitada a 19 mm.

Segundo a norma ASTM C33, composição granulométrica é a distribuição de dimensão das partículas de um material granular entre várias faixas granulométricas,

normalmente expressa em termos de porcentagem acumulada maior ou menor do que cada uma das aberturas de uma série de peneiras, ou da porcentagem entre certa faixa de aberturas das peneiras.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), há vários motivos para especificar os limites granulométricos e a dimensão máxima do agregado. O mais importante é a sua influência sobre a trabalhabilidade e o custo. Areias muito grossa produzem mistura de concreto áspera e não trabalhável e areias muito finas aumentam a demanda de água, não sendo econômicas. Agregados de granulometria contínua, ou seja, que não apresentam grande deficiência ou excesso de qualquer dimensão de partícula produzem as misturas de concretos mais trabalháveis e econômicas.

#### 2.4.6 - Água de Amassamento

Para Neville (1997), normalmente a água de amassamento não se torna um fator relevante na resistência dos concretos pelo fato de que as especificações recomendam o preparo do concreto com água potável, onde dificilmente esta água possui sólidos dissolvidos acima de 1000 ppm (partes por milhão). Porém as impurezas, sólidos químicos e orgânicos dissolvidos quando em excesso afetam a resistência, tempo de pega e geram eflorescência, causando corrosão da armadura.

#### 2.4.7 - Aditivos e Adições

Segundo Mehta e Monteiro (2008), aditivos incorporadores de ar aumentam o volume de vazios no concreto diminuindo sua resistência final. Quanto aos aditivos redutores de água, os mesmos podem elevar tanto a resistência inicial quanto a resistência final. Os aditivos capazes de acelerar ou retardar a hidratação do cimento terão grande influência na resistência.

Adições minerais devem ser utilizadas em substituição parcial ao cimento, por questões ecológicas e também pelo desempenho, onde o efeito retardador sobre a resistência inicial, reduzindo a porosidade da matriz e da zona de transição na interface pasta / agregado, melhorando a resistência final e estanqueidade do concreto. As adições minerais são mais efetivas na resistência à tração do concreto.

#### 2.4.8 - Sílica Ativa

É um subproduto da indução de fornos à arco nas indústrias de silício metálico e ligas ferro-silício. A redução do quartzo em silício a temperaturas de até 2000°C produz vapores de SiO, que se oxidam e condensam na zona de baixa temperatura do forno em partículas esféricas minúsculas, consistindo em sílica não-cristalina. O material, removido pela filtragem dos gases expelidos em filtros manga, possui um diâmetro na ordem de 0,1 µm e área superficial específica entre 15 e 25 m<sup>2</sup>/kg. Comparadas ao Cimento Portland comum e cinzas volantes típicas, amostras de sílica ativa mostram distribuições de tamanho de partícula que são duas ordens de grandezas mais finas. O material é altamente pozolânico, mas é de difícil manuseio e aumenta consideravelmente a necessidade de água no concreto, a menos que um alto índice de aditivos redutores de água seja usado no concreto. Os subprodutos das indústrias de silício metálico e liga ferro-silício produzem ligas com 75% ou maior teor de silício, contendo de 85 a 95% de sílica não-cristalina. Os subprodutos da liga ferro-silício com 50% de silício contêm um teor muito menor de sílica e é inadequado para uso como material pozolânico (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A Sílica Ativa é um pó fino pulverizado decorrente do processo de fabricação do silício metálico ou ferro-silício. Portanto é um produto de origem metalúrgica, o que lhe confere maior estabilidade quanto a sua composição química e física.

No processo de fabricação do silício metálico, é gerado um gás (SiO) que, ao sair do forno elétrico oxida-se formando a sílica amorfa (SiO<sub>2</sub>), que é captada em filtros de manga, em seguida armazenada em silos adequados e embalada em big-bags e sacos de 15 kg.

As partículas de Sílica Ativa são esféricas, vítreas e possuem um diâmetro médio menor do que 1 µm, apresentando altíssima superfície específica e uma massa específica aparente baixa. O alto teor de SiO<sub>2</sub> no formato amorfo (não cristalino), aliado a uma elevada finura, proporciona altíssima reatividade com os produtos decorrentes da hidratação cimento, conferindo melhor desempenho em concretos e argamassa (TECNOSILBR, 2010).

#### 2.4.9 - Mistura e Produção

A mistura é operação importante na produção de concretos, pois se reúnem todos os materiais constituintes dos mesmos, ao final da mistura, o concreto deve apresentar uma composição homogênea. A mistura mal executada leva o concreto a ser heterogêneo, causando problemas com as propriedades relativas à resistência.

A mistura manual pode ser utilizada, mas este processo é lento e pouco eficiente, geralmente é admitido em obras de pequeno porte ou em quantidades pequenas de concreto. Geralmente utilizam-se betoneiras ou misturadores.

O efeito mistura pode ser apreciado pelo gráfico da Figura 7. Como se pode ver, com o aumento do tempo de mistura, aumenta a resistência média e diminui a diferença entre os valores máximo e mínimo da resistência.

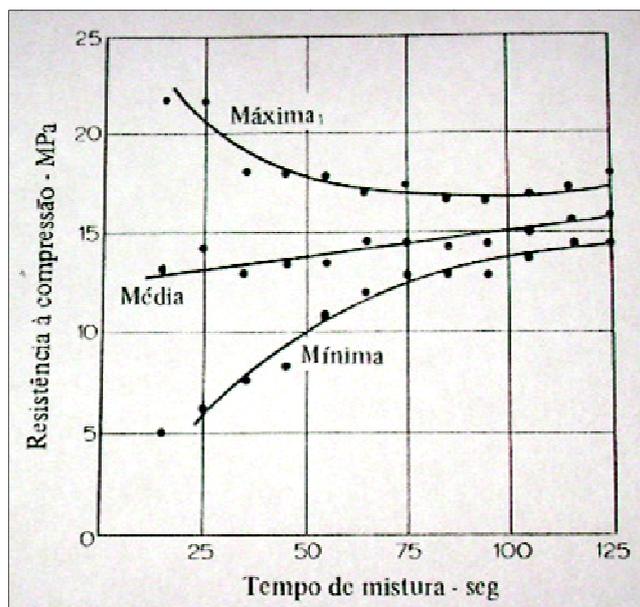


Figura 7 – Gráfico do efeito do tempo de mistura com a resistência à compressão axial

(Fonte: Boletim Concreto / 035 – Produção de concreto - PINI)

O aumento da resistência média significa que uma boa mistura faz com que seja melhor aproveitada a resistência do cimento, e a menor diferença entre valores extremos significa maior homogeneidade. Nota-se, também, nessa figura que após cerca de 100 segundos, a melhora da mistura é bem pequena, o que significa que o tempo ótimo situa em torno desse valor (GIAMUSSO, 1992).

#### 2.4.10 - Outros Fatores

A forma do corpo-de-prova padronizado no Brasil é o cilíndrico com 15 centímetros de diâmetro e 30 centímetros de altura. Também se utilizam corpos-de-prova cilíndricos com 10 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura. Sempre mantendo a relação de a altura ser igual a duas vezes o diâmetro do cilindro (GIONGO, 2007).

Formas prismáticas e cúbicas são adotadas em outros países, com vantagem operacional para a forma cúbica que não precisa de cuidados especiais para permitir melhor contato com os pratos da máquina, pois só uma face do cubo fica sem fôrma para permitir a moldagem (GIONGO, 2007).

O concreto, material poroso, que contem vazios de variados tamanhos e formas na matriz e microfissuras na zona de transição na interface, os tipos de ruptura sob tensão são muito complexos e variam conforme o tipo de tensão. Sob tração uniaxial, basta uma energia relativamente baixa para o início o desenvolvimento de fissuras na matriz. A progressão rápida e a interligação do sistema de fissuração, que consiste em fissuras pré-existentes na zona de transição e novas fissuras formadas na matriz, contribuem para a ruptura frágil. Na compressão, o modo de ruptura é menos frágil, porque é necessária energia consideravelmente maior para que fissuras se formem e se desenvolvam na matriz (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Geralmente, admite-se que, em um ensaio de compressão uniaxial no concreto de baixa ou média resistência, as fissuras não se iniciam na matriz até cerca de 50% da tensão de ruptura. Nesse estágio, um sistema estável de fissuras, chamado fissuras de cisalhamento, já existe nas proximidades do agregado graúdo. Em níveis mais elevados de tensão, as fissuras se iniciam na matriz, sua quantidade e tamanho crescem progressivamente com o aumento dos níveis de tensão (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Na Figura 8 é mostrado um corpo-de-prova sendo submetido a um ensaio de compressão axial.



Figura 8 – Corpo-de-prova sendo submetido a um ensaio de compressão axial

(Fonte: Os autores setembro de 2009)

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as fissuras na matriz e zona de transição na interface (fissuras de cisalhamento) acabam por se agrupar; normalmente, uma superfície ruptura se desenvolve cerca de  $20^\circ$  a  $30^\circ$  a partir da direção da carga.

A Figura 9 apresenta um corpo-de-prova com ruptura cônica, consequência de adensamento e retífica satisfatórios.



Figura 9 – Corpo-de-prova com ruptura cônica, consequência de adensamento e retífica satisfatórios.

(Fonte: Os autores setembro de 2009)

#### 2.4.11 - Condições e Velocidade de Carregamento

Os ensaios para determinação da resistência do concreto são feitos com velocidade constante de aplicação da força na máquina de ensaio. Com isso o ensaio demora poucos minutos. O resultado tem a finalidade de, portanto, controlar a resistência do concreto (GIONGO, 2007).

#### 2.4.12 - Retração Autógena

É um fenômeno químico que ocorre durante a hidratação do cimento em função da necessidade de água para complementar o processo de hidratação. Como existe água livre no interior dos poros capilares há uma migração para dar continuidade a este processo, causando tensões capilares capazes de formar fissuração. Este tipo de deformação independe de trocas de umidade com o ambiente, temperatura e esforços externos (SILVA e DANTAS, 2005).

A sua prevenção é feita com o fornecimento contínuo de água para o concreto neste período, por meio da cura úmida ou do uso de agregados leves saturados de água, que funcionam como um reservatório. Há aditivos redutores de expansão que atuam na diminuição da tensão superficial da água dos poros e também podem ser usados na fabricação do concreto (SILVA e DANTAS, 2005).

Já a evaporação da água que fica nos poros menores ou aderidos aos cristais da pasta de cimento, causa o que é chamado de retração hidráulica. Este fenômeno acontece de fora para dentro da peça quando a umidade ambiente atinge valores baixos, próximos de 30% (SILVA e DANTAS, 2005).

As fissuras resultantes não costumam ser muito profundas, são irregulares e distribuem-se aleatoriamente. Este tipo de retração pode ocorrer ao longo de anos e também é chamado de retração por secagem (SILVA e DANTAS, 2005).

As primeiras horas de hidratação do cimento são acompanhadas por uma significativa liberação de calor e dilatação da peça de concreto, que ao se resfriar sofre o que é chamado de retração térmica. Este fenômeno de dilatação e contração aumenta com o consumo de cimento e com as dimensões da peça e pode originar fissuras extensas e profundas (SILVA e DANTAS, 2005).

A prevenção pode ser feita pelo resfriamento dos componentes do concreto, inclusive substituindo parte da água por gelo, e pelo uso de cimentos de baixo ou moderado calor de hidratação – Cimento Portland Pozolânico, por exemplo. A

concretagem de grandes volumes em etapas auxilia a dissipar o calor e reduzir a expansão (SILVA e DANTAS, 2005).

Nem sempre é simples determinar qual a causa de uma retração, especialmente porque os diferentes tipos costumam ocorrer simultaneamente e a retração final acaba sendo uma somatória de cada um dos efeitos. Estudando o assunto mais profundamente é possível estimar as proporções da retração total e com isso dosar e executar o concreto de maneira a inibir fissurações (SILVA e DANTAS, 2005).

#### 2.4.13 - Fatores de Influência

Obtém-se cura úmida com aspersão de água, ou molhagem, ou cobertura da superfície do concreto com areia, serragem ou mantas de algodão molhados.

Uma vez que a quantidade de água de amassamento usada na mistura de concreto é normalmente maior do que a necessária para hidratação do cimento (estimada em cerca de 30% da massa do cimento), a aplicação apropriada de uma membrana impermeável logo após o lançamento do concreto é uma maneira aceitável para manter o desenvolvimento da resistência a uma velocidade satisfatória. Entretanto a cura úmida deve ser o método preferencial quando for importante controlar a fissuração devido à retração autógena ou retração térmica.

Estudos confirmam que a influência da umidade da cura contínua na resistência do concreto após 180 dias a uma dada relação água/cimento, foi três vezes maior do que um concreto de cura ao ar, provavelmente como resultado de microfissuração na zona de transição da interface causada pela retração de secagem (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

#### 2.4.14 - Condições de Cura

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a cura inicia após o lançamento do concreto onde finaliza seu tempo de pega, influenciado pela combinação de condições que promovem a hidratação do cimento, como tempo, temperatura e umidade. Numa dada relação água/cimento a porosidade de uma pasta de cimento hidratada é determinada pelo grau de hidratação do cimento. Sob condições normais de temperatura alguns dos componentes constituintes do cimento começam a se hidratar logo que a água é adicionada, mas as reações de hidratação se

desaceleram consideravelmente quando os produtos da hidratação cobrem os grãos de cimento anidro. Isso ocorre porque a hidratação pode se processar satisfatoriamente apenas sob condições de saturação; quase se interrompe quando a pressão de vapor de água nos capilares cai abaixo de 80% da umidade de saturação.

Tempo e umidade são, portanto, fatores importantes no processo de hidratação controlado pela difusão de água. Adicionalmente como todas as reações químicas, a temperatura tem um efeito acelerador nas reações de hidratação (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

#### 2.4.15 - Tempo

Normalmente em condições de cura úmida e temperatura constante, quanto maior for o período de cura, maior a resistência, uma vez que a hidratação do cimento anidro está em curso. Em condições de cura ao ar livre, onde há uma perda de água por capilaridade através da evaporação da mesma, principalmente em peças de concreto delgadas, a resistência não aumentará com o tempo. Para concretos com cimento comum sem adição é recomendado um período de 07 (sete) dias para a cura úmida, sendo que ao se usar cimentos compostos ou adições minerais o período de cura deverá ser maior. Existem vários métodos para execução da cura úmida, tais como: aspersão direta de água, cobertura superficial de areia, serragem ou mantas de algodão umedecidas. Também se pode utilizar da aplicação de uma membrana impermeável após o lançamento do concreto, obtendo-se resultados satisfatórios. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

#### 2.4.16 - Temperatura

Na cura úmida a resistência depende do histórico tempo-temperatura da moldagem e cura. Em temperaturas entre 5 e 46° C, quando o concreto é moldado e curado a uma temperatura constante específica, geralmente quanto maior a temperatura maior será a resistência do concreto. Concretos curados e moldados a temperatura abaixo de 5° C ficam com resistência, aos 28 dias, cerca 80% menor do que para temperaturas entre 21 e 46° C, por outro lado aos 180 dias estes mesmos concretos chegam a resistências mais altas. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

## 2.5 - Ensaio de Resistência à Compressão.

A resistência à compressão é definida pela pressão exercida por uma força uniformemente distribuída sobre uma superfície plana, perpendicular à direção da força. No concreto ela está definida pela tensão necessária para rompê-lo.

Segundo descrito pela norma NBR 5739 (ABNT, 2007) a estrutura de aplicação de força deve ter a capacidade compatível com os ensaios a serem realizados, permitindo a aplicação controlada da força sobre o corpo-de-prova colocado entre os pratos de compressão.

O prato que se desloca deve ter movimento na direção vertical, coaxial ao prato fixo. O corpo-de-prova cilíndrico deve ser posicionado de modo que, quando estiver centrado, seu eixo coincida com o da máquina, fazendo com que a resultante das forças passe pelo centro (ABNT NBR 5739/2007).

Os corpos-de-prova moldados devem atender ao estabelecido na norma NBR 5739 (ABNT, 2007), os mesmos devem atender a relação altura/diâmetro (h/d) nunca maior do que 2,02. Caso esta relação seja menor do que 1,94, efetuar as correções descritas na tabela 03.

Tabela 3 – Fator de correção para aplicação na relação altura/diâmetro

Relação h/d	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87

(Fonte NBR 5739/2007)

Antes da execução do ensaio, devem ser preparados os topos dos corpos-de-prova, de acordo com estabelecido na norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Após a preparação das bases, deve-se garantir que os corpos-de-prova mantenham sua condição de cura.

### 2.5.1 - Procedimento de Execução do Ensaio

Determinar o diâmetro utilizado para o cálculo da área da seção transversal com exatidão de  $\pm 0,1$  mm, pela média de dois diâmetros, medidos ortogonalmente na metade da altura do corpo-de-prova. Determinar a altura do corpo-de-prova que deve ser medida sobre seu eixo longitudinal, com precisão de 0,1 mm, incluindo o capeamento. Os corpos-de-prova devem ser rompidos à compressão em uma dada

idade especificada, com as tolerâncias de tempo descritas na tabela 4. Em se tratando de corpos-de-prova moldados de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2003), a idade deve ser contada a partir da hora de moldagem (ABNT NBR 5739/2007).

Tabela 4 – Especificação das idades dos corpos-de-prova e suas tolerâncias permitidas.

<b>Idade de ensaio</b>	<b>Tolerância permitida (h)</b>
24 horas	0,5
3 dias	2
7 dias	6
28 dias	24
63 dias	36
91 dias	48

NOTA: Para outras idades de ensaio, a tolerância deve ser obtida por interpolação.

(Fonte NBR 5739/2007)

O carregamento de ensaio deve ser aplicado continuamente e sem choques, com a velocidade de carregamento de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s. A velocidade de carregamento deve ser mantida constante durante todo o ensaio e só deve cessar quando houver uma queda de força que indique sua ruptura (ABNT NBR 5739/2007).

#### Resultados

A resistência à compressão deve ser calculada através da seguinte expressão, conforme equação 1:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad \text{equação 1}$$

Onde:

$f_c$  é a resistência à compressão, em MegaPascal

$F$  é a força máxima alcançada, em Newton

$D$  é o diâmetro do corpo-de-prova, em milímetro

O resultado da resistência à compressão deve ser expresso em megapascal, com três algarismos significativos.

O relatório de ensaio de corpos-de-prova moldados deve conter no mínimo as seguintes informações: (ABNT NBR 5739/2007).

- Número de identificação do corpo-de-prova;
- Data de moldagem;
- Idade do corpo-de-prova;
- Data do ensaio;
- Dimensões dos corpos-de-prova;
- Tipo de capeamento empregado;
- Classe da máquina de ensaio;
- Resultado de resistência à compressão individual dos corpos-de-prova e do exemplar;
- Tipo de ruptura do corpo-de-prova. (opcional)

## **2.6 - Métodos Estatísticos**

Os métodos estatísticos constituem a melhor base para se determinar a qualidade e a resistência do concreto e para exprimir os resultados de uma forma útil. (ACI 214/1977)

### **2.6.1 - Funções Estatísticas**

Os valores da resistência dos corpos-de-prova de concreto de obras controladas se distribuem segundo uma curva semelhante à curva de distribuição normal, conforme Figura 10. Quando existe um controle eficiente, os valores de resistência se agruparão perto da média, e a curva será alta e estreita. À medida que as variações de resistência aumentam, os valores se espalham e a curva torna-se baixa e larga, como se vê nas curvas teóricas da Figura 10. Pelo fato de que as características de tais curvas podem ser definidas matematicamente.

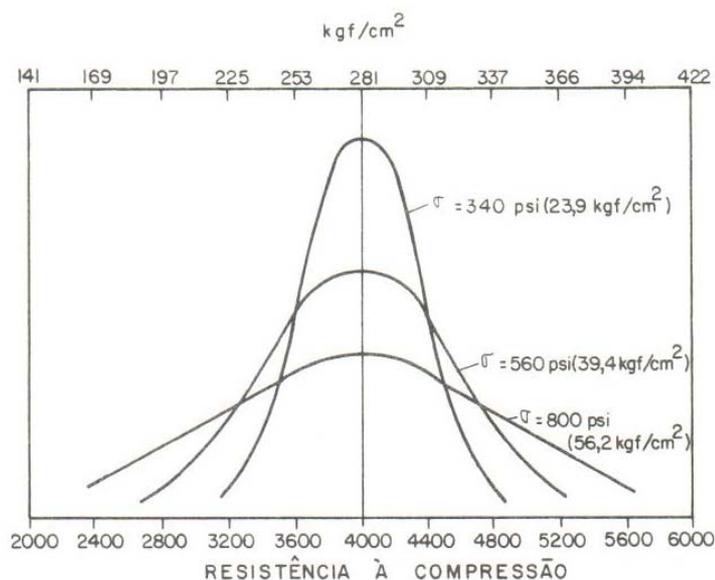


Figura 10 – Curvas de frequência normais para diferentes desvios padrão

(Fonte Controle Estatístico de Concreto ACI 214-77 pág.08)

### 2.6.2 - Média ( $\bar{X}$ )

A resistência média de todos os ensaios individuais é obtida conforme a equação 2:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} \quad \text{equação 2}$$

Onde

$X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n$  são os resultados de resistência de ensaios individuais e  $n$  é o número total de corpos-de-prova ensaiados. Um ensaio é definido como a resistência média de todos os corpos-de-prova da mesma idade, feitos de uma amostra tirada de uma única série.

### 2.6.3 - Desvio Padrão ( $\sigma$ )

A medida mais reconhecida de dispersão é a raiz da média quadrática do desvio ou afastamento das resistências da sua média. Esta medida estatística é conhecida como desvio padrão e pode ser considerada como sendo o raio de

giração da figura que envolve a linha de simetria da área sob a curva de distribuição de frequência dos dados de resistência, como mostra a figura 11.

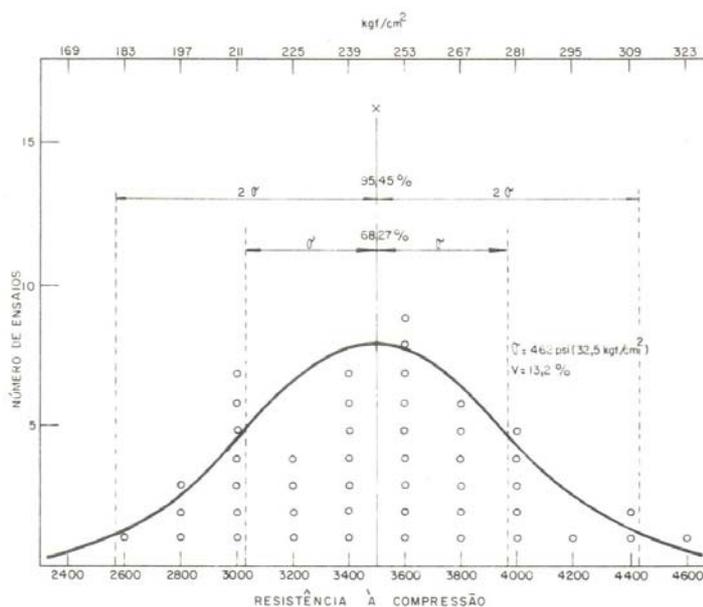


Figura 11 – Frequência de distribuição dos valores de resistência e distribuição normal correspondente

(Fonte Controle Estatístico de Concreto ACI 214-77 pág.08)

A melhor estimativa de  $\sigma$ , baseado numa quantidade finita de resultados, é obtida pela equação 3.

$$\sigma = \sqrt{\frac{[(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2]}{n - 1}} \quad \text{equação 3}$$

Onde:

$\bar{X}$  representa os resultados de resistência de ensaios individuais.

#### 2.6.4 - Coeficiente de Variação (CV)

O coeficiente de variação é expresso em termos de porcentagem conforme a equação 4, sendo o desvio padrão ( $\sigma$ ) dividido pela média ( $\bar{X}$ )

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100 \quad (4)$$

### 2.6.5 - Análise da Variância

A análise de variância é um teste estatístico amplamente difundido entre os analistas, e visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Os fatores propostos podem ser de origem qualitativa ou quantitativa, mas a variável dependente necessariamente deverá ser contínua (FONSECA *et al*, 2009).

A principal aplicação da ANOVA (*Analysis Of Variance*) é a comparação de médias oriundas de grupos diferentes, também chamados tratamentos, como por exemplo, médias históricas de questões de satisfação, empresas que operam simultaneamente com diferentes rendimentos, entre muitas outras aplicações (FONSECA *et al*, 2009).

Existem dois métodos para calcular-se a variância: dentro de grupos (MQG) e a variância das médias (MQR). Em uma ANOVA, calculam-se esses dois componentes de variância. Se a variância calculada usando a média (MQR) for maior do que a calculada (MQG) usando os dados pertencentes a cada grupo individual, isso pode indicar que existe uma diferença significativa entre os grupos. Existem dois tipos de problemas a serem resolvidos através da ANOVA, a níveis fixos ou a níveis aleatórios. A aleatoriedade determinada à questão do problema. Na grande maioria dos casos trata-se de níveis fixos, afinal o segundo tipo de problema (aleatório) somente surgirá quando ocorrer um estudo envolvendo uma escolha aleatória de fatores (FONSECA *et al*, 2009).

Segundo Levine *et al*. (1998) a ANOVA gera um teste F, no qual a hipótese nula, que pressupõe não haver diferença em utilizar o tratamento, composição ou método adotado nas diversas Fases da pesquisa, pode ser rejeitada, em um nível de significância  $\alpha$  selecionado, somente se a estatística  $F$  calculada exceder o valor de  $F_s$  (tabelado).

Para estas análises utilizou-se o *software STATGRAPHICS® Plus 4.1*

### 2.6.6 - Teste de Comparação de Médias

A análise da ANOVA é utilizada para determinar se existe diferença entre os diversos grupos considerados. Uma vez que as diferenças nas médias sejam encontradas, é importante determinar quais grupos, em particular, são importantes.

Para tal análise utilizou-se, neste trabalho, o procedimento de *Tukei-Kramer*, através do mesmo *software STATGRAPHICS® Plus 4.1*

Esse método é um exemplo de procedimento de comparação a posteriori, uma vez que as hipóteses de interesse são formuladas depois que os dados foram inspecionados pela ANOVA.

## 2.7 - Métodos de Dosagem

### 2.7.1 - Método de Dosagem ABCP

Este método é indicado para concretos de consistência plástica fluída e contra indicado para concretos com agregados leves. Os resultados devem ser testados numa mistura experimental para a comprovação das características especificadas para o concreto.

### 2.7.2 - Definição da Relação Água/Cimento (a/c)

Considera-se nesta etapa a resistência mecânica e a durabilidade que se deseja do concreto.

Quanto à resistência mecânica, a relação água/cimento pode ser estimada pelo gráfico a seguir, obtido através de traços realizados com cimentos brasileiros. Se a classe do cimento não é conhecida, adota-se a classe 25, que é a mínima especificada para cimentos nacionais. A Figura 12 representa a curva de relação água/cimento para resistência à compressão axial aos 28 dias.

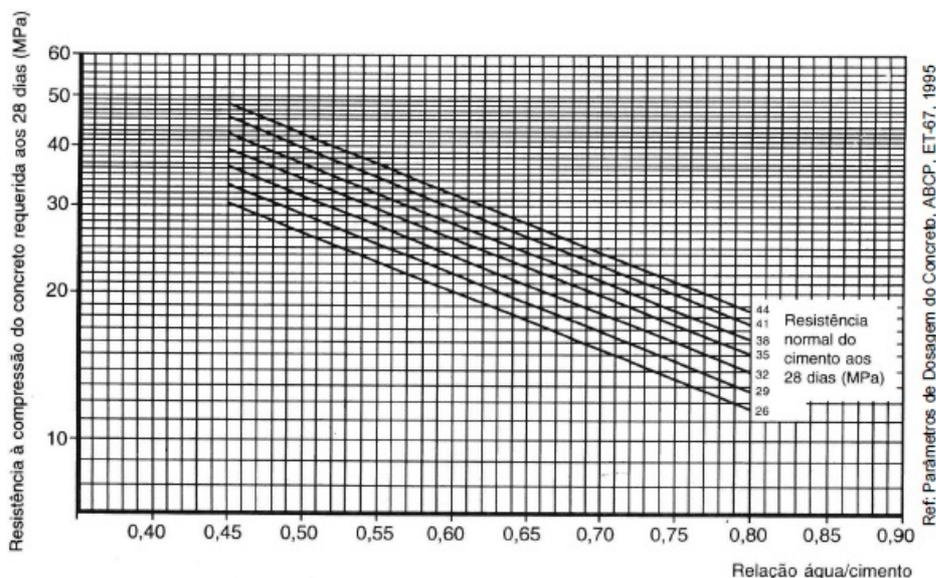


Figura 12 – Curva de relação água/cimento para resistência à compressão axial aos 28 dias

(Fonte manual de dosagem da ABCP)

Quanto à durabilidade, a relação água/cimento dever ser adotada conforme tabela 5 a seguir, extraída da norma NBR 12655 (ABNT, 1996).

Tabela 5 – Relação água/cimento quanto à durabilidade

Concreto	Tipo	Classe de Agressividade			
		I	II	III	IV
Relação a/c	Armado	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
	Protendido	≤0,60	≤0,55	≤0,50	≤0,45
Classe de concreto	Armado	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40
	Protendido	≥C25	≥C30	≥C35	≥C40
<i>Nomenclatura ( I, II, III e IV )</i>		<i>Fraca</i>	<i>Moderada</i>	<i>Forte</i>	<i>Muito Forte</i>

(Fonte manual de dosagem da ABCP)

### 2.7.3 - Determinação Aproximada de Consumo De Água (Ca)

A quantidade de água necessária para que o concreto atinja um determinado abatimento depende da dimensão máxima característica, da granulometria e forma dos agregados e da quantidade de ar incorporado. Na falta de valores experimentais e de uma lei matemática que conduza resultados seguros, pode-se estimar a quantidade de água pela tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Estimativa da quantidade de água de amassamento por m<sup>3</sup>.

Consumo de água aproximado (l/m <sup>3</sup> )					
Abatimento (mm)	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

(Fonte manual de dosagem da ABCP)

Experimentalmente o consumo de água pode ser obtido em duas ou três tentativas com o emprego da expressão, conforme equação 5.

$$C_{ar} = C_{ai} \left( \frac{a_r}{a_i} \right)^{0.1} \quad \text{equação 5}$$

Onde:

$C_{ar}$  = Consumo de água requerida;

$C_{ai}$  = Consumo de água inicial;

$a_r$  = Abatimento requerido.

#### 2.7.4 - Determinação do Consumo de Cimento (C)

O consumo de cimento ( $C$ ) é igual ao quociente do consumo de água ( $C_a$ ) pela relação água/cimento ( $a/c$ ), obtido conforme equação 6

$$C = \frac{C_a}{a/c} \quad \text{equação 6}$$

#### 2.7.5 - Determinação do Consumo de Agregado Graúdo (CG)

O consumo do agregado graúdo pode ser obtido do quadro a seguir, em função da dimensão máxima característica ( $D_{max}$ ) e do módulo de finura (MF) da areia, representados na tabela 7.

Tabela 7 – Determinação do consumo de Agregado Graúdo por m<sup>3</sup>.

Volume compactado seco ( $V_G$ ) de agregado graúdo por m <sup>3</sup> de concreto					
MF	$D_{\text{máx}}$ (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

(Fonte manual de dosagem da ABCP)

A determinação de  $C_G$  é feita pela expressão, conforme equação 7.

$$C_G = V_G \times Mu_G \left( \frac{kg}{m^3} \right) \quad \text{equação 7}$$

Em geral, o agregado graúdo é utilizado na composição de duas ou mais graduações. No Brasil, as britas são classificadas comercialmente em graduações que vão da brita zero (B0) até a brita quatro (B4) conforme a tabela 8, experiências realizadas pela ABCP, revelaram que é possível obter menores volumes de vazios utilizando-se as composições indicadas na tabela 9 de proporcionamento de britas.

Tabela 8 – Classificação comercial de britas

Classificação Comercial das Britas	
BRITA 0	4,8 mm a 9,5 mm
BRITA 1	9,5 mm a 19 mm
BRITA 2	19 mm a 25 mm
BRITA 3	25 mm a 38 mm
BRITA 4	38 mm a 76 mm

(Fonte manual de dosagem da ABCP)

Tabela 9 – Proporcionamento de britas

Proporcionamento de Britas	
B0, B1	30% B0 e 70% B1
B1, B2	50% B1 e 50% B2
B2, B3	50% B2 e 50% B3
B3, B4	50% B3 e 50% B4

(Fonte manual de dosagem da ABCP)

### 2.7.6 - Determinação do Consumo de Agregado Miúdo ( $C_m$ )

A determinação do consumo de areia é feita pela diferença dos demais constituintes do concreto já determinados anteriormente, através da equação 8.

$$V_m = 1 - \left( \frac{C}{\rho_c} + \frac{C_G}{\rho_G} + \frac{C_a}{\rho_a} \right) \quad \text{equação 8}$$

Onde  $\rho_c$   $\rho_G$   $\rho_a$  são as massas específicas do cimento, agregado graúdo e água, respectivamente.

O consumo da água será obtida pela equação 9.

$$C_m = \rho_m \times V_m \quad \text{equação 9}$$

Onde  $\rho_m$  é a massa específica da areia.

### 2.7.7 - Método de Dosagem do CAD (AÏTCIN, 2000)

É uma combinação de resultados empíricos e de cálculos matemáticos baseados no método do valor absoluto. A água trazida pelo superplastificante é considerada como parte da água de mistura.

O procedimento é iniciado pela seleção de cinco diferentes características do traço ou proporções de materiais, na seguinte seqüência:

- Relação água/aglomerante
- Teor de água
- Dosagem de superplastificante
- Teor de agregado graúdo
- Teor de ar incorporado (valor adotado)

### 2.7.8 - Relação Água/Aglomerante

A relação água/aglomerante sugerida pode ser encontrada na figura 13 para uma dada resistência à compressão aos 28 dias (medida em cilindros faceados de 100 x 200 mm). Devido a variações de resistência de diferentes materiais cimentícios suplementares, a curva da figura 1 mostra uma larga faixa de valores da relação água/aglomerante para uma dada resistência. Se a eficiência dos diferentes materiais cimentícios suplementares não é conhecida de experiências anteriores, a curva média pode ser usada como uma estimativa inicial do traço.

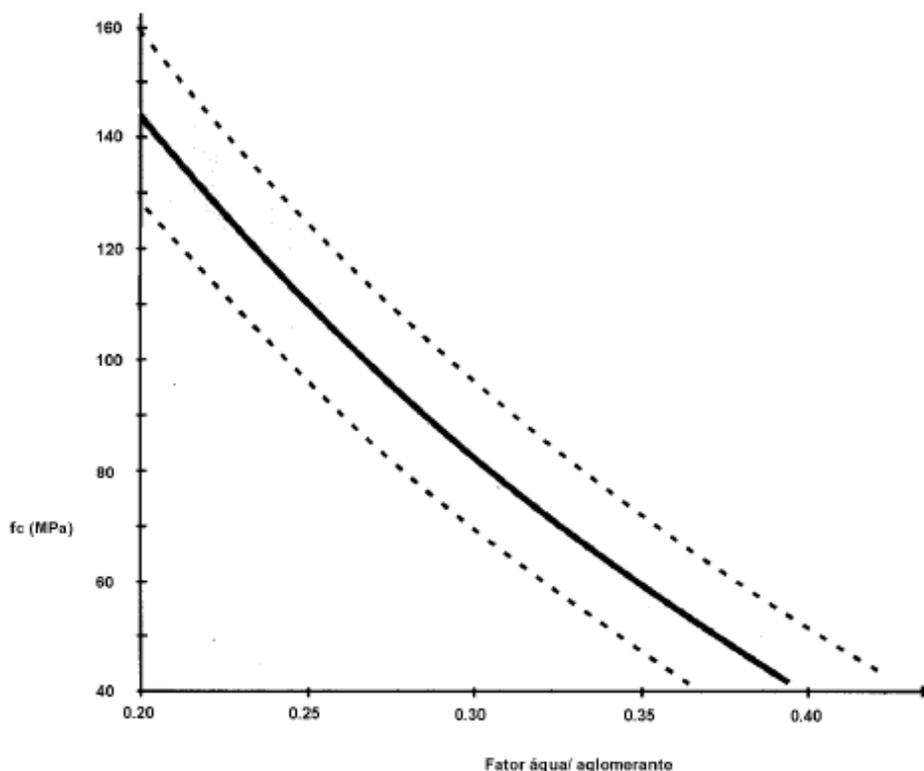


Figura 13 – Relações propostas entre a relação água/aglomerante e a resistência à compressão axial (Fonte AITCIN, 2000)

### 2.7.9 - Teor de Água

Uma dificuldade na dosagem de CAD é determinar o teor de água a ser usado para conseguir um abatimento de 200 mm 1 hora depois da mistura, pois a trabalhabilidade é controlada por diversos fatores: a quantidade de água inicial, a reatividade do cimento, a quantidade de superplastificante e seu grau de compatibilidade com o cimento em questão. Por conseguinte, um abatimento de 200 mm pode ser conseguido misturando um concreto com baixo teor de água e um alto teor de superplastificante ou com um teor de água mais alto e um teor menor de superplastificante. Do ponto de vista econômico não existe grande diferença entre as duas opções, mas do ponto de vista reológico a diferença pode ser significativa, dependendo da “reatividade reológica do cimento” e da eficiência do superplastificante (AITCIN, 2000).

Devido a diferenças de finura na composição de fases, na reatividade da fase, na composição e solubilidade do sulfato de cálcio dos cimentos, varia muito a quantidade de água mínima exigida para se conseguir um CAD de 200 mm de abatimento. Se a quantidade de água da mistura selecionada for muito baixa, a

mistura pode rapidamente tornar-se pegajosa e como terá que ser usada uma grande quantidade de superplastificante para se conseguir um abatimento mais alto, pode ser esperado algum retardamento.

A melhor maneira de se encontrar a combinação ideal de água de mistura e dosagem de superplastificante é levando a cabo experimentos de projeto fatorial. Na figura 14 é feita uma abordagem simplificada, baseada no conceito de ponto de saturação. Se o ponto de saturação de um superplastificante não é conhecido, sugere-se começar com um teor de água de 145 l/m<sup>3</sup>.

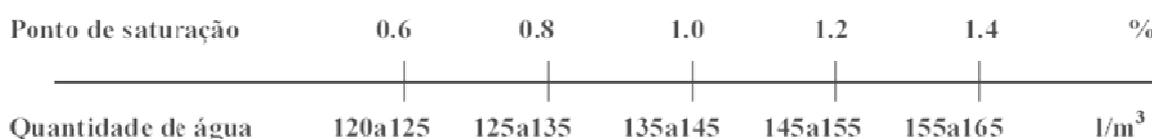


Figura 14 – Determinação da dosagem mínima de água

(Fonte AİTCIN, 2000)

#### 2.7.10 - Dosagem do Superplastificante

A dosagem do superplastificante pode ser deduzida da dosagem no ponto de saturação. Se o ponto de saturação não é conhecido, sugere-se começar com um teor de 1,0%.

A princípio é impossível conhecer o comportamento reológico de um concreto, a partir das especificações de um aditivo e de um tipo de cimento, com os baixos fatores água/material cimentício que são adotados para o CAD. No entanto, a trabalhabilidade do CAD é uma das suas principais características.

Conforme recomendação de Aİtcin (2000), o procedimento experimental inicia-se na elaboração de uma pasta com fator água/ material cimentante igual a 0,35 e uma dosagem de superplastificante que corresponda a um teor de sólidos de 1% da massa de material cimentício. Se o tempo de escoamento desta pasta estiver entre 60 e 90 segundos, prossegue-se o estudo, alterando-se a dosagem de superplastificante na razão de 0,2%, tanto para maior quanto para menor que 1%. Se o tempo de escoamento estiver acima de 90 segundos, deve-se então mudar o fator água/ material cimentício para 0,40. Caso a mistura ainda esteja apresentando um tempo de escoamento superior a 90 segundos, é recomendada a substituição do superplastificante ou do cimento. A temperatura da mistura deve ser controlada e

sendo mantida entre 200° C e 230° C. Caso haja dificuldade em controlar-se a temperatura da mistura, deve-se utilizar água com temperatura menor que 100° C, evitando-se assim a elevação excessiva de temperatura.

### 2.7.11 - Teor de Agregado Graúdo

A quantidade de agregado graúdo pode ser encontrada na figura 15 em função da forma típica das partículas. Se existe qualquer dúvida sobre a forma do agregado graúdo ou se a sua forma não é conhecida, um teor de 1.000Kg/m<sup>3</sup> de agregado graúdo pode ser usado inicialmente.

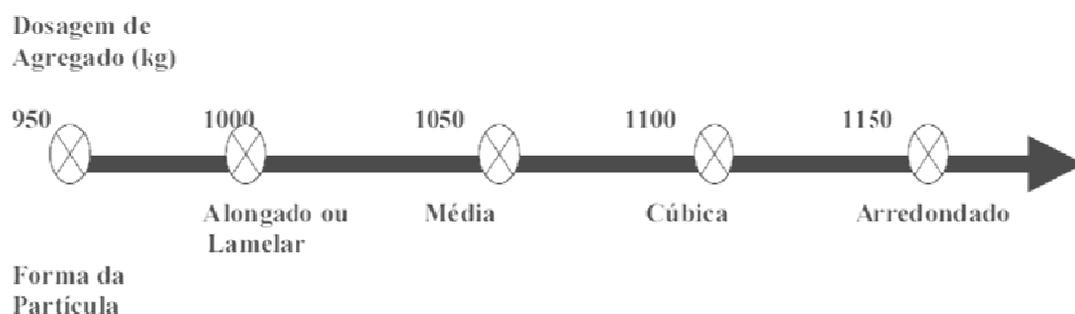


Figura 15 – Teor de agregado graúdo

(Fonte AITCIN, 2000)

### 2.7.12 - Teor de Ar

Para concretos de alto desempenho que serão usados em ambientes sem condições de congelamento, teoricamente não há necessidade de incorporar ar, portanto o único ar que estará presente na mistura é o ar aprisionado, cujo volume depende parcialmente das proporções do traço. Entretanto, para melhorar o manuseio do concreto no lançamento e no acabamento, sugere-se o uso de certa quantidade de ar incorporado (AITCIN, 2000).

Quando se fazem CAD com relação água/aglomerante muito baixa, observa-se que nem toda combinação cimento/superplastificante aprisiona a mesma quantidade de ar. Além disso, alguns misturadores tendem a aprisionar mais ar do que outros. Descobriu-se experimentalmente que é difícil conseguir menos do que 1% de ar aprisionado e que, no pior dos casos, o teor de ar aprisionado pode chegar a 3%. Por conseguinte, sugere-se usar 1,5% como uma estimativa inicial para o teor de ar aprisionado e, então, ajustá-lo com base nos resultados obtidos com as misturas experimentais.

### **3 - MÉTODOS E ENSAIOS**

Com vistas à obtenção de parâmetros para os diversos sistemas de regularização de corpos-de-prova, foi definido fazer a comparação entre cinco máquinas retificadoras disponíveis no mercado e utilizadas em concreteiras e laboratórios na área de concreto.

Foram utilizadas três classes de concreto, com as mesmas condições de adensamento e cura. Após 28 dias da sua moldagem foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial.

Para análise dos resultados foram utilizados métodos estatísticos, a partir dos resultados obtidos foi possível a comparação entre as cinco máquinas do estudo.

#### **3.1 - Escolha das Máquinas Retificadoras**

Como o processo de desbaste superficial dos corpos-de-prova consiste basicamente em remover uma fina camada de concreto utilizando disco rotativo diamantado, e que este processo é padrão nos equipamentos atualmente utilizados.

Para melhor confiabilidade nos resultados, das cinco máquinas analisadas três são utilizadas em laboratórios e duas em concreteiras, portanto as duas situações reais de aplicação destes equipamentos.

Os equipamentos serão numerados de 1 a 5, no qual será omitido o nome da instituição ou empresa proprietária dos mesmos, a fim de manter imparcialidade e não denegrir a marca do equipamento ou seu proprietário.

##### **3.1.1 - Descrição da Máquina 01**

A máquina número 01, ilustrada pela figura 16, consiste em um conjunto mecânico eletro-pneumático, no qual o conceito é o de submeter um corpo-de-prova, fixo em uma base metálica através de um sistema pneumático, a um disco rotativo adiamantado de desbaste acoplado a um motor elétrico onde a movimentação deste sistema é manual, portanto a velocidade do desbaste não é constante e seu sistema de refrigeração é através de água sem reaproveitamento da mesma.



Figura 16 – Máquina retificadora 01

(Fonte os autores - 2009)

### 3.1.2 - Descrição da Máquina 02

A máquina número 02, ilustrada pela figura 17, consiste em um conjunto mecânico eletro-pneumático, no qual o conceito é o de submeter um corpo-de-prova, fixo em uma base metálica através de um sistema pneumático, a um disco rotativo adiamantado de desbaste acoplado a um motor elétrico onde a movimentação deste sistema é automática, portanto a velocidade do desbaste é constante e seu sistema de refrigeração é através de água sem reaproveitamento da mesma.



Figura 17 – Máquina retificadora 02

(Fonte os autores – 2009)

### 3.1.3 - Descrição da Máquina 03

A máquina número 03, ilustrada pela figura 18, consiste em um conjunto mecânico e elétrico, no qual o conceito é a movimentação de um corpo-de-prova fixado a uma mesa coordenada, na qual o desbaste é realizado através de um disco rotativo adiamantado de desbaste acoplado em um motor elétrico fixo. A movimentação do corpo-de-prova é manual, sua velocidade não é constante e o sistema de refrigeração é com água, sendo a mesma reaproveitada.



Figura 18 – Máquina retificadora 03

(Fonte os autores – 2009)

### 3.1.4 - Descrição da Máquina 04

A máquina número 04, ilustrada pela figura 19, consiste em um conjunto mecânico eletro-pneumático, no qual o conceito é o de submeter um corpo-de-prova, fixo em uma base metálica através de um sistema pneumático, a um disco rotativo adiamantado de desbaste acoplado a um motor elétrico onde a movimentação deste sistema é manual, portanto a velocidade do desbaste não é constante, sendo a refrigeração executada pelo operador do equipamento simultaneamente ao movimento da máquina para execução do desbaste.



Figura 19 – Máquina retificadora 04

(Fonte os autores – 2009)

### 3.1.5 - Descrição da Máquina 05

A máquina número 05, ilustrada pela figura 20, consiste em um conjunto mecânico eletro-pneumático, no qual o conceito é o de submeter um corpo-de-prova, fixo em uma base metálica através de um sistema pneumático, a um disco rotativo adiamantado de desbaste acoplado a um motor elétrico onde a movimentação é automática, através de um mecanismo com acionamento pneumático, portanto a velocidade do desbaste é constante e seu sistema de refrigeração é através de água sem reaproveitamento. Entre todos os equipamentos analisados, possui o melhor conjunto em termos de mecanismo, pois ao colocar o corpo-de-prova na base e acionando o comando o equipamento realiza a operação totalmente automática.



Figura 20 – Máquina retificadora 05

(Fonte os autores – 2009)

### **3.2 - Determinação Das Classes De Concreto**

Foram escolhidas 03 classes de resistência de concreto, para avaliação das máquinas. Classe 30,0 MPa por ser um concreto usual em obras de pequeno e grande porte, classe 60,0 MPa para averiguar um concreto com características de concreto de alta resistência (CAR) e classe 90,0 MPa englobando concretos com características de concreto de alto desempenho (CAD).

### **3.3 - Caracterização Dos Materiais**

#### **3.3.1 - Aglomerantes**

Foram utilizados neste trabalho cimentos CP II – Z – 32 e CP V – ARI RS cujas características fornecidas pelo fabricante nas tabelas 11, 12, 13 e 14. Com o cimento CP II foi confeccionado o concreto de classe 30,0 MPa e com o CP V foram confeccionados os concretos com classes de 60,0 e 90,0 MPa. O cimento foi fabricado pela Cimentos Itambé.

## Características CP II – Z – 32 – (Ensaio Físicos)

Tabela 10 – Ensaio Físicos do cimento CP II-Z-32

Descrição	Unidade	CP II - Z - 32	ABNT
Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3.814	≥ 2.600
Tempo de início de pega	h:min	2:52	≥ 1:00
Tempo de fim de pega	h:min	3:39	≤ 10:00
Finura na peneira #200	%	1,72	≤ 12,00
Finura na peneira #325	%	8,61	-
Consistência Normal	%	27,53	-
Resistência à compressão 1 dia	MPa	14,1	-
Resistência à compressão 3 dias	MPa	25,5	≥ 10
Resistência à compressão 7 dias	MPa	31,8	≥ 20
Resistência à compressão 28 dias	MPa	40,5	≥ 32

(Fonte manual técnico do fabricante 2009)

## Características CP II – Z – 32 – (Ensaio Químicos)

Tabela 11 – Ensaio Químicos do cimento CP II-Z-32

Descrição	Unidade	CP II - Z - 32	ABNT
Perda ao fogo	%	5,35	≤ 6,50
Resíduo Insolúvel	%	13,79	≤ 16,00
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	%	2,99	≤ 4,00
Óxido de Cálcio Livre - CaO Livre	%	1,31	-
Óxido de Magnésio - MgO	%	4,00	≤ 6,50
Óxido de Alumínio – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	6,67	-
Óxido de Silício – SiO <sub>2</sub>	%	22,19	-
Óxido de Ferro – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,23	-
Óxido de Cálcio - CaO	%	53,72	-
Equivalente alcalino	%	0,83	-

(Fonte manual técnico do fabricante 2009)

## Características CP V – ARI RS – (Ensaio Físicos)

Tabela 12 – Ensaio Físicos do cimento CP V – ARI RS

Descrição	Unidade	CP V – ARI RS	Especificação ABNT
Blaine	cm <sup>2</sup> /g	4.977	≥ 3.000
Tempo de início de pega	h:min	2:05	≥ 1:00
Tempo de fim de pega	h:min	2:51	≤ 10:00
Finura na peneira # 200	%	0,17	≤ 6,00
Finura na peneira # 325	%	1,21	-
Consistência Normal	%	30,06	-
Resistência à compressão 1 dia	MPa	23,4	≥ 11
Resistência à compressão 3 dias	MPa	34,2	≥ 24
Resistência à compressão 7 dias	MPa	39,9	≥ 34
Resistência à compressão 28 dias	MPa	49,3	-

(Fonte manual técnico do fabricante 2009)

## Características CP V – ARI RS – (Ensaio Químicos)

Tabela 13 – Ensaio Químicos do cimento CP V – ARI RS

Descrição	Unidade	CP V – ARI RS	Especificação ABNT
Perda ao fogo	%	3,65	≤ 4,50
Resíduo Insolúvel	%	11,96	-
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	%	3,04	≤ 3,50
Óxido de Cálcio Livre - CaO Livre	%	1,45	-
Óxido de Magnésio – MgO	%	4,72	≤ 6,50
Óxido de Alumínio – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	6,39	-
Óxido de Silício – SiO <sub>2</sub>	%	22,17	-
Óxido de Ferro – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,19	-
Óxido de Cálcio – CaO	%	53,78	-
Equivalente alcalino	%	0,81	-

(Fonte manual técnico do fabricante 2009)

### 3.3.2 - Agregado Graúdo

Os agregados graúdos utilizados foram Brita 0 e Brita 1, possuem natureza quartzosa e são comercializados na cidade de Curitiba, oriundos da região metropolitana da mesma. Os ensaios foram realizados conforme a NBR NM 248/2003 da ABNT e os resultados obtidos encontram-se expressos nas tabelas 14, 15 e 16

#### Granulometria da Brita 0 (Pedrisco)

Tabela 14 – Granulometria da Brita 0 – Pedrisco

# Peneira (mm)	Massa (g)	Massa Retida (%)	Retida Acumulada (%)
19	0,00	0,00	0,00
12,5	3,4	0,34	0,34
9,5	66,1	6,62	6,96
6,3	532,4	53,28	60,24
4,8	328,5	32,87	93,11
Fundo	68,9	6,89	100,00
Σ Total	999,3	100,00	

(Fonte os autores 2009)

#### Granulometria da Brita 1

Tabela 15 – Granulometria da Brita 1

# Peneira (mm)	Massa (g)	Massa Retida (%)	Retida Acumulada (%)
25	0,00	0,00	0,00
19	72,2	2,46	2,46
12,5	1662,6	55,44	57,90
9,5	872,9	29,11	87,01
6,3	374,3	12,48	99,49
4,8	13,5	0,40	99,89
Fundo	3,4	0,11	100,00
Σ Total	2998,9	100,00	

(Fonte os autores 2009)

## Curvas Granulométricas (Brita 0 e Brita 1)

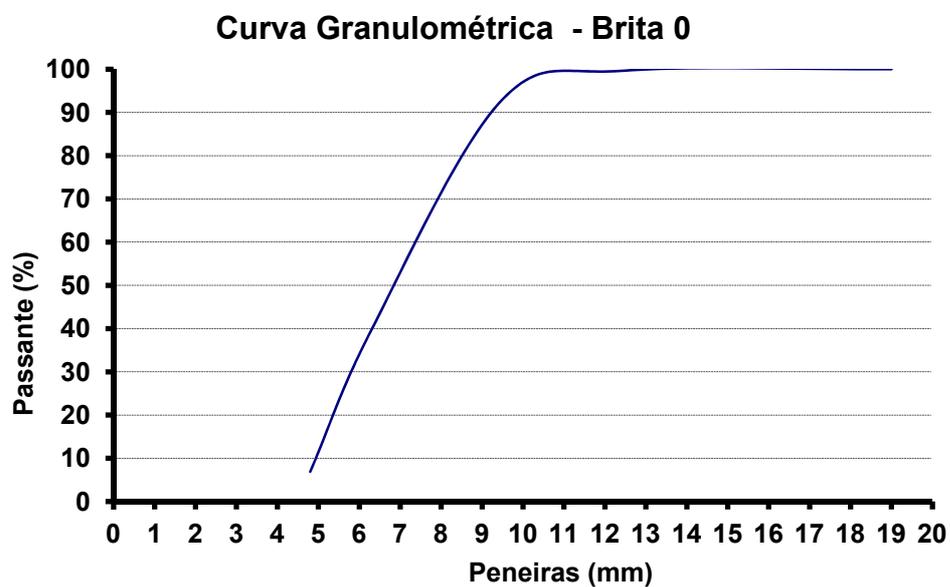


Gráfico 1 – Curva Granulométrica Brita 0

(Fonte os autores 2009)

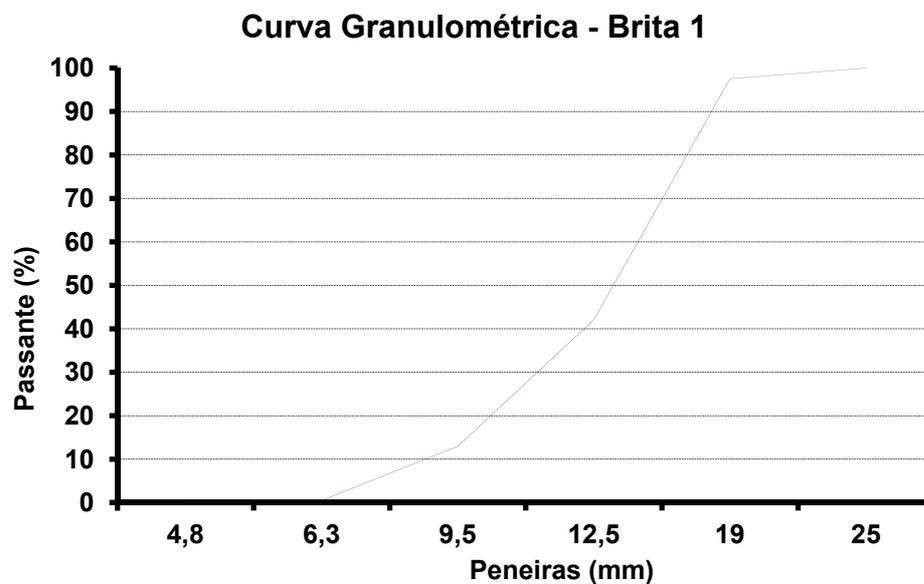


Gráfico 2 – Curva Granulométrica Brita 1

(Fonte os autores 2009)

## Caracterização

Tabela 16 – Caracterização das Britas 0 e 1

<b>Característica</b>	<b>Brita 0 (Pedrisco)</b>	<b>Brita 1</b>
Massa Específica Absoluta (kg/dm <sup>3</sup> )	2,83	3,08
Dimensão Máxima Característica (DMC) mm	12,5	19
Módulo de Finura	1,60	3,46
Umidade (%)	0	0

(Fonte os autores 2009)

### 3.3.3 - Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia mineral quartzosa oriunda de cavas da região metropolitana de Curitiba, comumente encontradas no comércio. Os ensaios foram realizados conforme a NBR NM 258/2005 da ABNT e os resultados obtidos encontram-se expressos nas tabelas 17 e 18.

#### Granulometria da Areia

Tabela 17 – Granulometria da Areia

<b># Peneira (mm)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Massa Retida (%)</b>	<b>Retida Acumulada (%)</b>
4,8	32,67	3,27	3,27
2,4	144,46	14,47	17,74
1,2	187,28	18,72	36,46
0,6	172,38	17,27	53,73
0,3	275,19	27,52	81,25
0,15	157,58	15,76	97,01
Fundo	29,87	2,99	100,00
$\Sigma$ Total	999,43	100,00	

(Fonte os autores 2009)

## Caracterização

Tabela 18 – Caracterização do Agregado Miúdo

<b>Característica</b>	<b>Areia</b>
Massa Específica Absoluta (kg/dm <sup>3</sup> )	2,59
Dimensão Máxima Característica (DMC) mm	4,8
Módulo de Finura	2,89
Umidade (%)	0

(Fonte os autores 2009)

Curva granulométrica

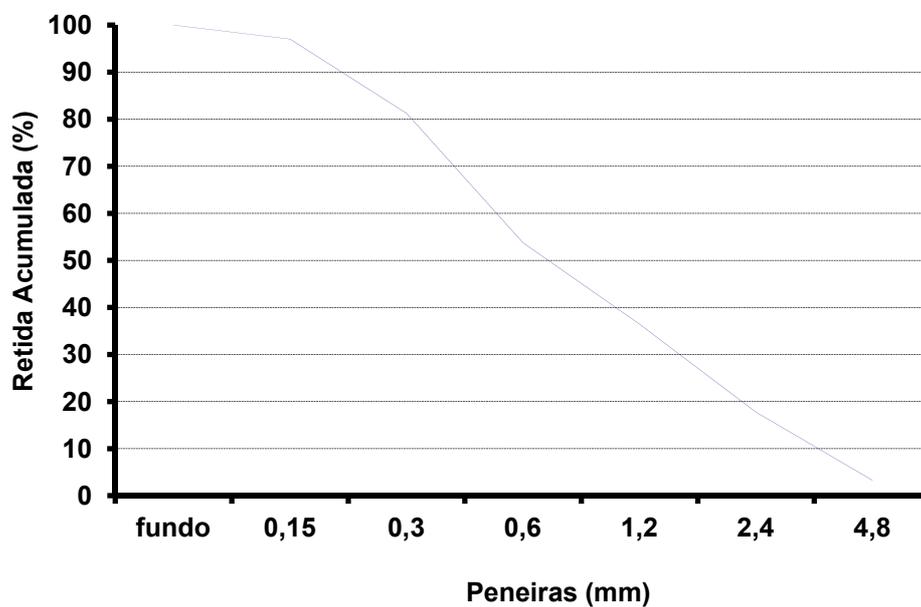


Gráfico 3 – Curva Granulométrica do Agregado Miúdo

(Fonte os autores 2009)

### 3.3.4 - Adição

O material escolhido foi a sílica ativa, devido a sua utilização em concretos CAR e CAD. Adquirida no comércio local, suas propriedades estão descritas na tabela 19.

Tabela 19 – Características da Adição – Sílica Ativa da TECNOSIL

Características Físicas e Químicas	
Massa específica	2.220 kg/m <sup>3</sup>
Teor de SiO <sub>2</sub>	> 90%
Superfície específica (B.E.T.)	~19.000 m <sup>2</sup> /kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio da partícula	0,20 µm
Massa específica	2.220 kg/m <sup>3</sup>
Massa Unitária	
Não densificado	< 350 kg/m <sup>3</sup>
Densificada	> 350 kg/m <sup>3</sup>
Comparativo de finura de alguns materiais	
Sílica Ativa	~19.000 m <sup>2</sup> /kg
Fumaça do cigarro	~10.000 m <sup>2</sup> /kg
Fly Ash (Pozolana)	400a 700m <sup>2</sup> /kg
Cimento Portland	300 a 500m <sup>2</sup> /kg

(Fonte www.tecnosilbr.com.br - consultado em 2010)

### 3.3.5 - Aditivo

O aditivo utilizado nos concretos de classes 60,0 e 90,0 MPa foi o SIKA VISCORETE 3535 possui as característica descritas na tabela 20. A dosagem recomendada pelo fabricante para um concreto plástico é de 0,5 a 1,0% sobre o peso total de aglomerante.

Tabela 20 – Características do Aditivo SIKA VISCORETE 3535

Características	
Ação Principal	Redutor de água de altíssima eficiência
Composição Básica	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho Claro
Densidade a 25° C	1,04 a 1,08 kg/l
PH	3,5 a 5,5

(Fonte Catálogo de produto SIKA - 2011)

### 3.3.6 - Água de Amassamento

A água utilizada para o preparo dos concretos era potável oriunda do poço artesiano da UTFPR.

### 3.3.7 - Proporcionamento dos Materiais

Os métodos de dosagem utilizados foram os desenvolvidos pela ABCP para a classe de resistência de 30,0 MPa e AITCIN (2000) para as classes de resistência 60,0 e 90,0 MPa. Para os cálculos dos concretos especiais, levou-se em conta a quantidade de água presente nos aditivos, a qual foi deduzida da água total utilizada nos mesmos.

### 3.3.8 - Processo de Preparo dos Concretos

Os concretos foram preparados no Laboratório do Departamento Acadêmico de Construção Civil - DACOC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Os materiais foram separados, secados e dosados em conformidade com a norma NBR 12655 (ABNT, 1996), conforme ilustrado na figura 21.



Figura 21 – Materiais dosados antes do preparo do concreto

(Fonte Os autores - 2009)

O proporcionamento dos materiais por metro cúbico ( $m^3$ ) para o preparo dos concretos foi em conformidade com a tabela 21.

Tabela 21 – Proporcionamento dos materiais por m<sup>3</sup>

Classe de Resistência	30,0 MPa	60,0 MPa	90,0 MPa
Cimento (kg)	390	382	452
Sílica Ativa (kg)	-	33	39
Areia (kg)	552	800	853
Brita 0 (kg)	511	1000	1000
Brita 1 (kg)	765	-	-
Água (l)	195	145	140
Fator água/aglomerante	0,500	0,350	0,285
Aditivo (l)	-	9,43	10,22
Abatimento (mm)	60	160	180

(Fonte Os autores - 2009)

Em termos práticos os traços foram os seguintes:

- 30 MPa → 1 : 0,00 : 1,41 : 1,31 : 1,96 : 0,500 : 0,000
- 60 MPa → 1 : 0,09 : 2,09 : 2,62 : 0,00 : 0,350 : 0.025
- 90 MPa → 1 : 0,09 : 1,89 : 2,21 : 0,00 : 0,285 : 0.023

Os concretos foram preparados em betoneira do tipo eixo inclinado com capacidade de 320 litros, conforme ilustra a figura 22. Para preservar a relação água/aglomerante foi realizada a imprimação da betoneira. Os materiais foram introduzidos na mesma em movimento obedecendo à seguinte sequencia:



Figura 22 – Ilustração da betoneira utilizada nos preparos dos concretos

(Fonte Os autores - 2009)

Para a classe de resistência de 30,0 MPa:

- 100% da brita
- 100% da água
- 100% do cimento
- 1 minuto de mistura
- 100% de areia
- 2 minutos de mistura

Para as classes de resistência de 60,0 e 90,0 MPa:

- 100% da brita
- 80% da água
- 100% do cimento
- 100% da sílica
- 1 minuto de mistura
- 20% da água com 100% de aditivo
- 100% de areia
- 2 minutos de mistura

Encerrado o tempo da mistura, foi retirada uma amostra de cada betonada para ensaio de consistência através do teste de abatimento do tronco de cone, conforme a norma NM-67 (CMN, 1996) e comprovado na figura 23.



Figura 23 – Ensaio de consistência através do teste de abatimento do tronco de cone (slump test)

(Fonte Os autores - 2009)

Observou-se que o tempo de mistura dos concretos especiais foi superior ao do concreto convencional, devido à necessidade de maior energia de amassamento aplicada ao concreto.

O cronograma de execução das dosagens dos concretos foi realizado de acordo com a tabela 22.

Tabela 22 – Cronograma de execução dos trabalhos

Classe	30 MPa	60 MPa	90 MPa
Moldagem	28/09/2009	02/10/2009	30/09/2009
Rompimento	26/10/2009	29/10/2009	28/10/2009

(Fonte Os autores - 2009)

Para cada betonada foi preparado 80 litros de concreto para a moldagem de 40 corpos-de-prova cilíndricos. Moldados em moldes metálicos previamente preparados com desmoldante

Os corpos-de-prova foram adensados mecanicamente, utilizando vibrador de mesa elétrico, conforme figura 24. Após a moldagem os mesmos foram mantidos em

ambiente de laboratório por aproximadamente 24 horas. Após, foram retirados dos moldes metálicos e transportados até os locais reservados nos tanques de imersão.



Figura 24 – Adensamento mecanizado dos corpos-de-prova

(Fonte Os autores - 2009)

Decorridos 18 dias da última mistura foi iniciado o processo identificação, padronizado conforme a figura 25, e medição conforme demonstram as Figuras 26 e 27 respectivamente. No outro dia foram distribuídos nos locais onde se encontravam as retíficas disponíveis. Posteriormente foram coletados, novamente medidos e devolvidos para o tanque de imersão até a data dos respectivos rompimentos.

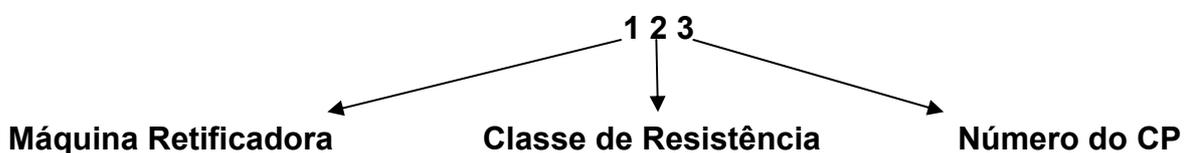


Figura 255 – Identificação dos corpos-de-prova

(Fonte Os autores - 2009)



Figura 266 – Identificação dos corpos-de-prova

(Fonte Os autores - 2009)

O processo de verificação de medidas dos corpos-de-prova obedeceu a um critério da média de três valores coletados com aproximação de duas casas decimais. Para a verificação do diâmetro as medidas foram realizadas de 60 em 60 graus transversais ao eixo de cada corpo-de-prova e três medidas no sentido longitudinal obedecendo à mesma regra. Estas medidas foram realizadas antes e depois do desbaste, a fim de correlacionar a medida de altura e o diâmetro conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2003).



Figura 277 – Medição dos corpos-de-prova

(Fonte Os autores - 2009)

A verificação da massa dos corpos-de-prova se fez necessária para uma possível avaliação de falha de adensamento.

Antes do início do ensaio de compressão axial, foi realizado o teste do carbono para verificação visual da planicidade dos corpos-de-prova, onde os mesmos foram movimentados, sentido transversal ao eixo do cilindro, sobre uma folha de papel carbono em uma superfície plana.

O ensaio de compressão axial foi realizado no Laboratório do Departamento Acadêmico de Construção Civil - DACOC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, utilizando a prensa computadorizada.

## 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 - Resultados dos Desbastes das Retíficas

Os dados referentes ao ensaio das Médias dos Desbastes, Médias da Relação Altura pelo Diâmetro ( $h/d$ ), Médias das tensões, juntamente com os parâmetros estatísticos utilizados para as variáveis analisadas onde os resultados foram submetidos a um comparativo pelo procedimento de *Tukei-Kramer*, através do software *STATGRAPHICS® Plus 4.1*, apresentados nas tabelas 23, 24 e 25.

Tabela 23 – Apresentação dos resultados para a classe de 30 MPa

Máquinas	Desbastes (mm)	h/d	Tensões (MPa)	Sd	CV	Comparativo			
1	4,43	2,01	26,96	4,07	15,11			B	A
2	2,63	2,03	36,12	2,86	7,92	D			
3	4,56	2,01	32,40	3,11	9,60		C		
4	2,23	2,03	37,31	3,55	10,46		C	B	
5	4,08	2,02	37,31	1,74	4,65				A

(Fonte Os autores - 2012)

Através do teste de *Tukei-Kramer* para uma confiabilidade de 95% não existem diferenças estatísticas entre as máquinas 1 e 5, bem como não existem diferenças estatísticas significativas entre as máquinas 3 e 4 sendo que a máquina 2 apresenta diferença estatística para todas as demais.

Tabela 244 – Apresentação dos resultados para a classe de 60 MPa

Máquinas	Desbastes (mm)	h/d	Tensões (MPa)	Sd	CV	Comparativo			
1	4,68	2,02	58,00	8,34	14,38			B	
2	3,59	2,03	70,24	9,49	13,51		C		
3	3,64	2,04	64,76	10,60	16,38		C	B	
4	2,49	2,04	70,03	6,12	8,74			B	
5	4,04	2,02	80,48	2,18	2,70				A

(Fonte Os autores - 2012)

A análise de variância demonstrou a existência de diferença significativa entre as médias para 5% de significância e 95% de confiança. Da mesma forma utilizando o teste de *Tukei-Kramer* verificou-se não existir diferenças significativas entre as máquinas 1, 3 e 4.

Tabela 255 – Apresentação dos resultados para a classe de 90 MPa

Máquinas	Desbastes (mm)	h/d	Tensões (MPa)	Sd	CV	Comparativo			
1	3,68	2,03	54,14	15,57	28,76				A
2	2,53	2,04	99,75	7,97	7,99		C		
3	4,25	2,02	84,05	12,87	15,32			B	
4	2,08	2,06	90,22	10,15	11,25			B	A
5	3,01	2,03	93,64	4,73	5,05			B	A

(Fonte Os autores - 2012)

A análise de variância demonstrou a existência de diferença significativa entre as médias para 5% de significância e 95% de confiança. Da mesma forma utilizando o teste de *Tukei-Kramer* verificou-se não existir diferenças significativas entre as máquinas da 1, 4 e 5 e também não havendo diferenças significativas entre as máquinas da 3, 4 e 5.

O Gráfico 04 apresenta as médias dos desbastes dos corpos-de-prova realizados nas retíficas, para as classes 30,0, 60,0 e 90,0 MPa respectivamente. Cada valor plotado indica a média de 08 corpos-de-prova retificados em cada máquina. Os resultados das máquinas 01, 03 e 05 mostraram que por serem manuais os desbastes foram maiores e nas máquinas 02 e 04 foram menores, uma vez que as mesmas são mecanizadas. A proximidade dos valores de cada máquina mostra que a calibração dos desbastes não sofrem alterações significativas, as amplitudes não ultrapassaram a 2,5mm.

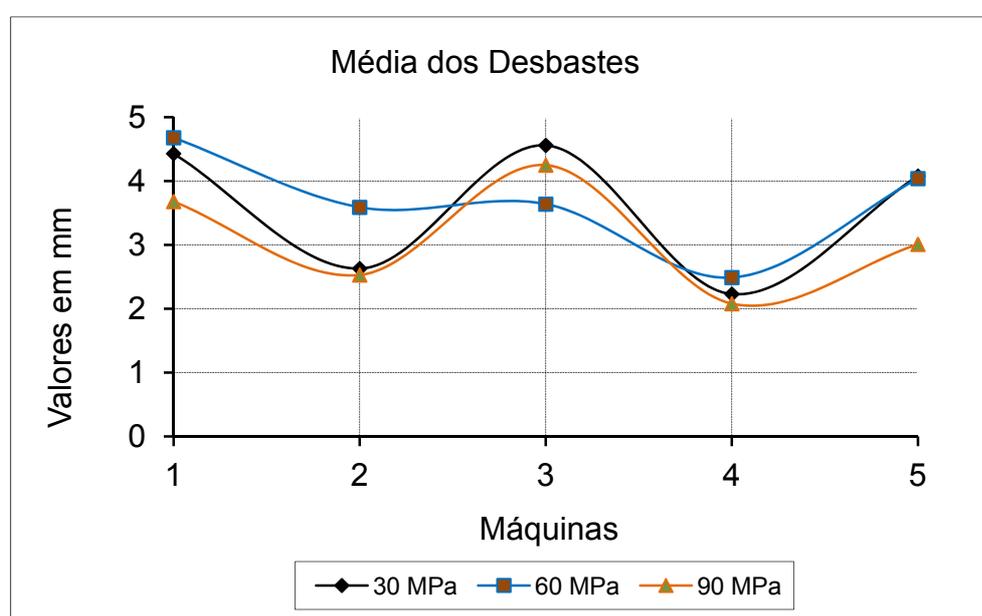


Gráfico 4 – Médias dos desbastes dos corpos-de-prova das retíficas para 30,0, 60,0 e 90,0 MPa  
(Fonte Os autores - 2009)

## 4.2 - Resultados da Relação h/d

O Gráfico 05 apresenta as médias da relação altura / diâmetro dos corpos-de-prova retificados, para as classes 30,0, 60,0 e 90,0 MPa respectivamente. Cada valor indica a média de 08 corpos-de-prova retificados em cada máquina. Como na maioria das classes dentro as máquinas não satisfazem o prescrito na norma NBR 5738 (ABNT, 2003), não foi aplicado o fator de correção nos resultados de resistência de compressão axial.

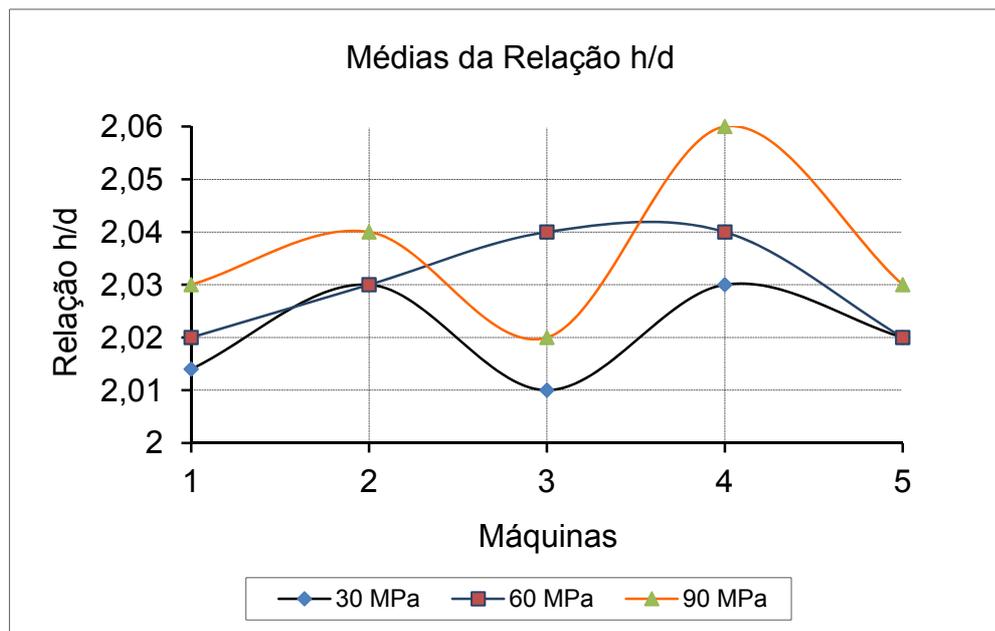


Gráfico 5 – Média da relação h/d das retíficas para as classes 30,0, 60,0 e 90,0 MPa

(Fonte Os autores – 2009)

### 4.3 - Resultados da Resistência à Compressão

O Gráfico 06 apresenta as médias das tensões de ruptura dos corpos-de-prova retificados, ao ensaio de compressão axial para as classes de 30,0, 60,0 e 90,0 MPa. Cada valor indica a média de 08 corpos-de-prova retificados em cada máquina. A qualidade dos desbastes foi o fator predominância nos resultados. As máquinas não foram efetivas em planicidade e paralelismo, as discrepâncias dos resultados abaixo do esperado foram originadas pela falta de planicidade, como mostra a figura 27 através do teste do carbono e a figura 28 durante o ajuste do êmbolo da prensa ao corpo-de-prova.

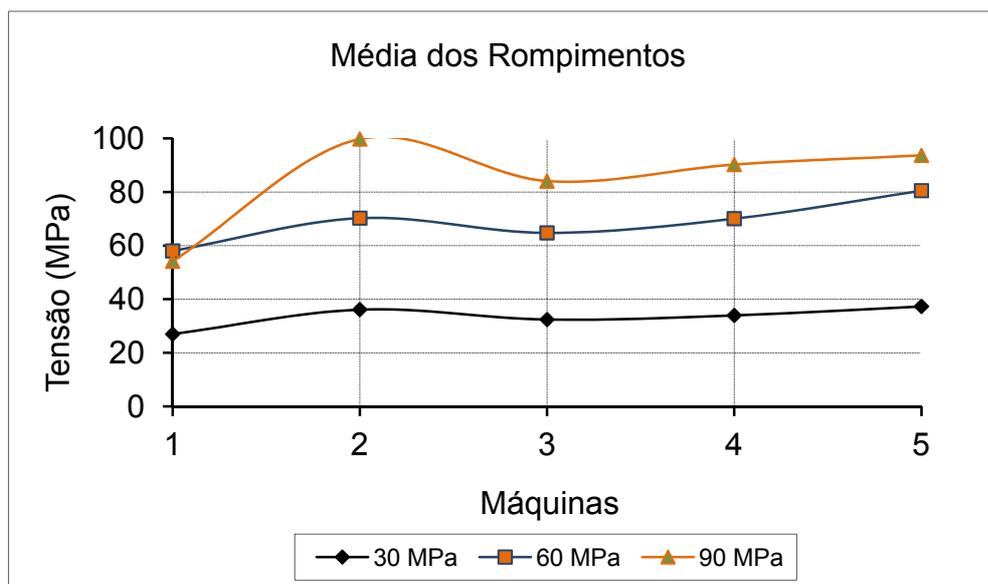


Gráfico 6 – Médias das tensões de ruptura dos corpos-de-prova retificados, ao ensaio de compressão axial

(Fonte Os autores - 2009)



Figura 28 – Teste do carbono efetivo em corpo-de-prova retificado

(Fonte Os autores - 2009)



Figura 29 – Ajuste do êmbolo da prensa ao corpo-de-prova

(Fonte Os autores - 2009)

#### **4.4 - Análise Estatística dos Resultados**

Os Gráficos 07 e 08 apresentam o Desvio Padrão (Sd) e o Coeficiente de Variação (CV) para os resultados das médias das tensões de ruptura dos corpos-de-prova retificados, ao ensaio de compressão axial para as classes de 30,0, 60,0 e 90,0 MPa, respectivamente. A máquina 05 apresentou menor Desvio Padrão e menor Coeficiente de Variação, sendo estatisticamente a mais eficiente.

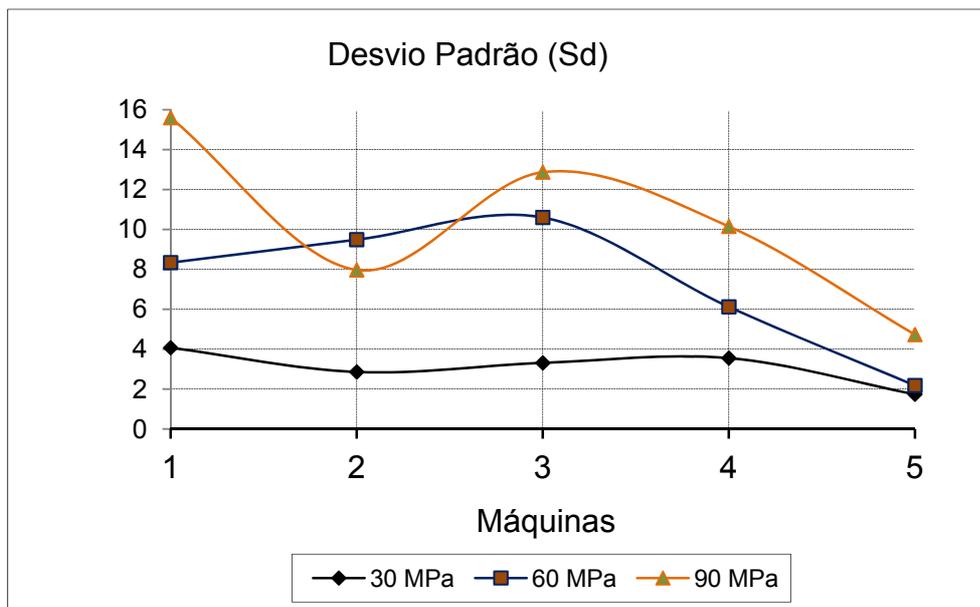


Gráfico 7 – Resultado do Desvio Padrão dos resultados das tensões de ruptura

(Fonte Os autores - 2009)

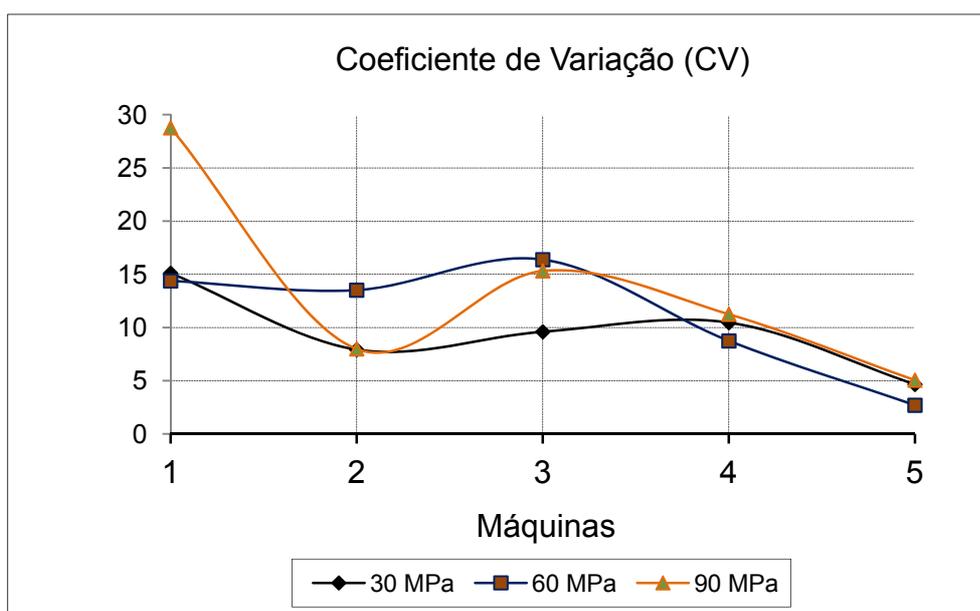


Gráfico 8 – Resultado do Coeficiente de variação dos resultados das tensões de ruptura

(Fonte Os autores - 2009)

## 5 - CONCLUSÕES

Considerando a metodologia utilizada, os resultados dos ensaios e a análise estatística pode-se concluir que:

- As condições de preparo, adensamento e cura não foram fatores relevantes nos resultados obtidos;
- Quanto maior a resistência dos concretos menor será a confiabilidade dos resultados;
- As máquinas automatizadas tem um melhor desempenho na regularização das superfícies dos corpos-de-prova;
- As máquinas 02, 03, 04 e 05 são estatisticamente comparáveis entre si;
- As condições mecânicas, desgastes dos discos e operação são fatores de influência direta no resultado das retíficas dos corpos-de-prova;
- A máquina 05 apresentou, estatisticamente, maior confiabilidade dentre as demais.

### 5.1 - Sugestões para Pesquisas Futuras

- Comparação entre a qualidade da retífica em diferentes idades do concreto no período de cura;
- Realizar um estudo entre menos retíficas e maior número de exemplares de corpos-de-prova moldados nas mesmas características;
- Elaborar um estudo para montar um procedimento para diminuir os fatores de influência de uma retífica.

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, P. C. – **Concreto de Alto Desempenho**. 1ª Edição – Editora PINI - São Paulo, 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete ACI 214-77** – Tradução de Eduardo Santos BASÍLIO. 3ª edição - São Paulo – Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP - 1984

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 617** – Standard practice for capping cylindrical concrete specimens. ASTM Committee C09 on Concrete and concrete Aggregates, 1998 (Reapproved 2003).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1231/C1231M – 10** Standard practices for use of unbonded caps in determination of compressive strength of hardened concrete cylinders. ASTM Committee C09 on Concrete and concrete Aggregates, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C33/C33M – 11** Standard Specification for Concrete Aggregates, 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215/1996** – Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. CB-18 – Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, CE-18:104.03 - Comissão de Estudo de Métodos de Ensaio de Cimento Portland, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739/2007** – Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. ABNT/CB-18 – Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, CE-18:301.02 - Comissão de Estudo de Ensaio Mecânicos para Concreto, Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738/2003** – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. ABNT/CB-18 - Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, CE-18:301.03 - Comissão de Estudo de Ensaio Físicos para Concreto Fresco, Rio de Janeiro, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7456/1982** - Plástico - Determinação da dureza Shore, Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211/2005** – Agregados para Concreto – Especificação. ABNT/CB-18 – Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, CE-18:200.01 - Comissão de Estudo de Especificação de Agregados, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655/1996** – Concreto, preparo, controle e recebimento. ABNT/CB-18 – Comitê Brasileiro de

Cimento, Concreto e Agregados, CE-18:305.01 - Comissão de Estudo de Procedimentos para Controle de Qualidade do Concreto, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248/2003** – Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. ABNT/CB-18 – Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655/1996** – Concreto, preparo, controle e recebimento. ABNT/CB-18 – Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, CE-18:305.01 - Comissão de Estudo de Procedimentos para Controle de Qualidade do Concreto, Rio de Janeiro, 1996.

BEZERRA, A. C. S. **Influência das Variáveis de Ensaio nos Resultados de Resistência à Compressão de Concretos: uma análise experimental e computacional**. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.

BUCHER, H. R. E. e RODRIGUES FILHO, H. C. - **Argamassas de enxofre para capeamento de corpos-de-prova**. Seminário sobre controle de resistência do concreto, IBRACON, São Paulo, 1983.

COMITÊ MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 67:96** - Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. CSM 05 – Comitê Setorial de Cimento e Concreto, 1996.

COMITÊ MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 77:96** - Concreto - Preparação das bases dos corpos-de-prova e testemunhos cilíndricos para ensaio de compressão. CSM 05 – Comitê Setorial de Cimento e Concreto, 1996.

FONSECA, JAIRO SIMON e MARTINS, G. de ANDRADE – **Curso de Estatística**. 6ª Edição – Editora Atlas S.A., 2009.

GIAMMUSSO, S. E. - **Produção de Concreto** - BOLETIM CONCRETO 035. Editora PINI, São Paulo, 1992.

GIONGO, J. S. – **Concreto Armado** – Introdução e propriedade dos materiais Trabalho apresentado a Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO – **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações** – 1ª Edição – Editora IBRACON, Volume I e II, 2005.

LEVINE, D.M., BERENSON, M.L., STEPHAN, D. **Statistics for Managers Using Microsoft® Excel** (Updated Version). Prentice Hall, Inc. a Simon & Schuster Company, 1998.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. – **Concreto** - Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3ª Edição – Editora IBRACON – São Paulo, 2008.

NEVILLE, A. M. – **Propriedades do Concreto**. 2ª Edição – Editora PINI – São Paulo, 1997.

SILVA, FRANCISCO GABRIEL SANTOS e DANTAS, ALEXON BRAGA - **Estudo sobre a Retração Autógena em Concretos de Alto Desempenho** - 9º Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e 5º Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2005.

TECNOSIL – **Catálogo Técnico** - Propriedades e Características. Disponível <http://www.tecnosilbr.com.br>. Acesso em: setembro de 2010.

SOLOTEST – **Catálogo Técnico** – Acessórios para capeamento de corpos-de-prova de concreto. Disponível <http://www.solotest.com>. Acesso em maio de 2011.